

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

EWERTON HALLAN DE LIMA SILVA

**ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO E POTENCIAL DE RENDIMENTO DA SOJA
NA REGIÃO DO SEALBA**

Maceió – AL

2022

EWERTON HALLAN DE LIMA SILVA

**ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO E POTENCIAL DE RENDIMENTO DA SOJA
NA REGIÃO DO SEALBA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Meteorologia, área de concentração Processos de Superfície Terrestre.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Júnior.

Maceió – AL

2022

Catlogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S586z Silva, Ewerton Hallan de Lima.

Zoneamento agroclimático e potencial de rendimento da soja na região do
SEALBA / Ewerton Hallan de Lima Silva. – 2022.

72 f. : il.

Orientador: Fabrício Daniel dos Santos Silva.

Coorientador: Rosiberto Salustiano da Silva Júnior.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas.
Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 56-63.

Anexos: f. 64-72.

1. Meteorologia agrícola. 2. Sergipe - Alagoas - Bahia. 3. Semeadura. 4.
Precipitação (Meteorologia). I. Título.

CDU: 551.577:631/635

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos orientadores professor Dr. Fabrício Daniel e professor Dr. Rosiberto Júnior, pessoas por quem tenho elevada estima, por todo o apoio, paciência e disponibilidade. Sem dúvida, não teria concluído este trabalho sem seus ensinamentos, sugestões e correções. Obrigado por terem aceito o desafio de me orientar, mesmo que eu tenha vindo de outra formação, o que demandou empenho e dedicação.

À minha querida família, por me apoiar nesse novo desafio após vários anos afastado das atividades universitárias. Agradeço ao meu irmão por plantar a semente de que era possível e factível integrar o grupo seletivo de profissionais da meteorologia, e em especial ao ICAT-UFAL.

A minha mãe e a minha esposa, que a todo momento estavam orgulhosas em me ver superando gradativamente as dificuldades de cada etapa até a concretização desta pesquisa.

Aos meus filhos, Vinícius Hallan e Hellen Gabriela, que me serviram de exemplo e sempre mostraram com seu comportamento, dedicação, persistência e resultados acadêmicos, que não existem obstáculos que não possam ser superados. Tanto que me vi em uma situação de não poder fraquejar, pois o nível que alcançaram me faz ter que buscar sempre a evolução e evitar acomodação.

Queria poder agradecer ao meu pai, que infelizmente não está mais em nosso convívio, meu grande exemplo. Deixou uma lacuna em meu coração não tê-lo comigo neste momento. Pai, espero que, onde você estiver, possa ver o resultado de seu legado e suas conquistas.

Por fim, agradeço ao nosso Deus, pela vida e por ter me dado a oportunidade de concluir este trabalho, sou muito grato ao Senhor.

RESUMO

Desde o início dos anos 2000, o Brasil é um dos principais produtores mundiais de grãos, com o agronegócio respondendo por cerca de 28% do PIB brasileiro em 2021. Nos últimos anos, surge no Brasil uma nova fronteira agrícola conhecida como SEALBA, sigla que se refere aos três estados brasileiros em que está localizada – Sergipe, Alagoas e Bahia – todos situados na Região Nordeste do país. Trata-se de uma extensa área com clima favorável para a produção de grãos, inclusive a soja. A precipitação é o principal fator climático determinante para as lavouras, entretanto ainda a uma escassez de estações meteorológicas na região SEALBA que permita monitorar e aplicar, com maior precisão espacial, esse conhecimento nas atividades agrícolas. Assim, foi realizada uma avaliação do desempenho de quatro diferentes bases de dados de precipitação de fontes alternativas para observação: duas de análises em grade, MERGE e CHIRPS, e as outras duas de reanálises do ECMWF, ERA5 e ERA5-Land. Como todos os bancos de dados fornecem dados atualizados, os mesmos servirão de entrada para o modelo agrometeorológico por déficit hídrico para determinar as janelas de plantio para o cultivo da soja, fornecendo um calendário de semeadura objetivando minimizar as possíveis perdas acarretadas por deficiências hídricas. Como resultado, tem-se que a região SEALBA possui condições climáticas ideais para a produção de grãos, em especial para a cultura da soja, cuja janela mais favorável ao cultivo vai de Fevereiro a Junho, com destaque para o mês de Abril com produção potencial estimada acima de 90%. Conclui-se também que as subáreas do norte de Alagoas possuem uma janela maior, seguidas pelas subáreas litorâneas, que apresentam o início do período chuvoso no final de Dezembro ao início de Janeiro, proporcionando, assim, uma janela mais ampla o cultivo de grãos.

Palavras-chave: Modelo agrometeorológico, SEALBA, período de semeadura, precipitação, reanálise.

ABSTRACT

Since the early 2000s, Brazil has been one of the main grain producers worldwide, with agribusiness accounting for about 28% of Brazilian GDP by 2021. A new agricultural frontier emerges in Brazil, known as SEALBA and referring to three states located in the Northeast Brazil: Sergipe, Alagoas and Bahia. This is an extensive area with a favorable climate for the production of grains, including soybeans. Considering that the rainfall is the main climatic factor for farming, the lack of meteorological stations in the SEALBA region represents an impairment for an accurate assessment of its farming potential. Therefore, a performance evaluation of four different precipitation databases from alternative sources was carried out for observation: Two grade analysis, MERGE and CHIRPS, and two ECMWF reanalysis, ERA5 and ERA5Land. As all databases provide up-to-date data, they will serve as input for the agrometeorological model for water deficit to determine the planting periods for soybean cultivation, providing a sowing calendar aiming to minimize the possible losses caused by water deficiencies. As a result, the SEALBA region has ideal climatic conditions for grain production, especially for soybean, whose most favorable period for cultivation is from February to June, with emphasis on the month of April with estimated potential production above 90%. It is also concluded that the northern Alagoas subareas have a larger cultivation period, followed by the coastal subareas, which the beginning of the rainy season occurs in late December to early January, providing a wider period for grain cultivation.

Keywords: Agrometeorological model, SEALBA, sowing period, precipitation, reanalysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos estados produtores de soja no Brasil.....	15
Figura 2 – Mapa de localização: (a) Mapa do Brasil com a região nordeste em cinza, (b) mapa do nordeste do Brasil com os estados de Alagoas, Sergipe e Bahia e (c) destaque da SEALBA com os devidos recortes municipais, com as localizações das estações meteorológicas do INMET.....	21
Figura 3 - Grade de pontos para cada base de dados da região SEALBA.....	24
Figura 4 - Variação do coeficiente da cultura (Kc) para cada decêndio do ciclo da germinação a produção da soja.....	30
Figura 6 - Média climática das estações meteorológicas da SEALBA, base de dados INMET, entre os anos de 2001-2020.....	32
Figura 7 - Comparativo das médias climáticas das bases de dados com estação INMET da SEALBA, (a) e (c) para a cidade de Maceió/AL, respectivamente para os meses de Junho-Julho-Agosto e Dezembro-Janeiro-Fevereiro, do período de 2001-2020, (b) e (d) para a cidade de Alagoinhas/Ba, respectivamente para os meses de Junho-Julho-Agosto e Dezembro-Janeiro-Fevereiro, do período de 2001-2020.....	34
Figura 8 - Distribuição espacial da precipitação pluviométrica média mensal da região SEALBA, das bases de dados (a) MERGE, (b) CHIRPS, (c) ERA5 e (d) ERA5-Land.....	35
Figura 9 - Diferença da distribuição espacial da precipitação pluviométrica média mensal da região SEALBA, (a) base MERGE, (b) e subtração com as bases CHIRPS (b), ERA5 (c) e ERA5-Land (d).....	36
Figura 10 - Média climática das bases de dados MERGE e INMET para as localidades das estações meteorológicas INMET no período de 2001-2020.....	38
Figura 11 - Distribuição espacial da produtividade relativa percentual média da soja dos 3 decêndios dos meses de Janeiro, Fevereiro e Março.....	41
Figura 12 - Distribuição espacial da produtividade relativa percentual média da soja dos 3 decêndios dos meses de Abril, Maio e Junho.....	42

Figura 13 - Distribuição espacial da produtividade relativa percentual média da soja dos 3 decêndios dos meses de Julho, Agosto e Setembro.....	43
Figura 14 - Distribuição espacial da produtividade relativa percentual média da soja dos 3 decêndios dos meses de Outubro, Novembro e Dezembro.....	44
Figura 15 - Produtividade relativa percentual média da soja por mês de cada decêndio.....	47
Figura 16 - Acumulado de precipitação quadrimestral (120 dias), referente ao ciclo de produção da soja, com potencial produção acima de 90%.....	48
Figura 17 - Precipitação acumulada por mês e decêndio para o ciclo de produção da soja com potencial produtivo acima de 90%, comparativo entre os pontos geográficos (a) lon=-36,25° e lat=-9,35° (próximo à Viçosa/AL) e (b) lon=-38,35° e lat=-11,65° (próximo à Itamira/BA).....	49
Figura 18 - Média do acumulado mensal de precipitação para o período de 2001 a 2020 e do ano 2018, referente ao ponto geográfico lon=-36,25° e lat=-9,35° (próximo à Viçosa/AL).....	50
Figura 19 - Produtividade potencial média mensal da SEALBA para a cultura da soja.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das estações meteorológicas convencionais localizadas na região SEALBA.....	22
Tabela 2 – Duração média de cada estágio fenológico de desenvolvimento com o coeficiente de produtividade (Ky).....	29
Tabela 3 – Análise estatística da precipitação pluviométrica mensal para as diferentes bases de dados meteorológicas, nas mesmas localidades das estações, durante o período de 2001-2020. Espaço amostral médio de 300 registros	33
Tabela 4 – Necessidade hídrica diária da soja por fase fenológica para cada decêndio....	45
Tabela 5 – Calendário de semeadura para o cultivo da soja de cada município da SEALBA, para cada decêndio	52

LISTA DE SIGLAS

AAS	- Alta do Atlântico Sul
ARM	- Armazenamento de Água no Solo
ARMc	- Armazenamento Crítico de Água no Solo
BAM	- Brazilian Global Atmospheric Model
BESM	- Brazilian Earth System Model
CAD	- Capacidade de campo
CHELSEA	- Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas
CHIRPS	- Base de dados Meteorológica – NOAA
CONAB	- Companhia Nacional de Abastecimento
CPTEC	- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DOL	- Distúrbios Ondulatórios de Leste
ECMWF	- Europa Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EMA	- Estação Meteorológica Automáticas
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMC	- Estação Meteorológica Convencional
ERA5	- Base de dados Meteorológica - ECMWF
ERA5-Land	- Base de dados Meteorológica - ECMWF
ETC	- Evapotranspiração da Cultura
ETM	- Evapotranspiração Máxima
ETP	- Evapotranspiração Potencial
ETR	- Evapotranspiração Real
GPCP	- Global Precipitation Climatology Project
GPM	- Global Precipitation Measurement
GTS	- <i>Global</i> Telecommunication System
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	- Intergovernmental Panel on Climate Change
Kc	- Coeficiente da Cultura
Ky	- Coeficiente de Produtiva
Ks	- Coeficiente de Umidade

MAE	- Erro Médio Absoluto
MAPA	- Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
MATOPIBA	- Sigla para os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia
MCG	- Modelos Climáticos Globais
MERGE	- Base de dados Meteorológica – CPTEC
NEB	- Nordeste Brasileiro
NOAA	- National Oceanic and Atmospheric Administration
PIB	- Produto Interno Bruto
r	- Coeficiente de Correlação de Pearson
rc	- Coeficiente de Correlação Crítica
RCP	- Representative Concentration Pathways
RMSE	- Raiz do erro quadrático médio
S	- Desvio padrão
SEALBA	- Sigla para os estados do Sergipe, Alagoas e Bahia
SF	- Sistemas Frontais
t	- Teste t de Student
VCAN	- Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
WMO	- World Meteorological Organization
ZCAS	- Zona de Convergência do Atlântica Sul
ZCIT	- Zona de Convergência Intertropical

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	Geral	16
1.1.2	Específicos.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	A cultura da soja.....	17
2.1	Modelo agrometeorológico.....	19
2.2	Clima na SEALBA	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	Área de estudo.....	22
3.2	Dados	23
3.2.1.	MERGE	24
3.2.2.	CHIRPS	24
3.2.3.	Dados de Reanálise.....	25
3.2.3.1.	ERA5 e ERA5-Land.....	25
3.3	Avaliação estatística	27
3.4	Modelo agrometeorológico de penalização por deficiência hídrica	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	Análise da base de dados.....	33
4.2	Zoneamento da melhor época de semeadura	41
4	CONCLUSÕES.....	55
5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
7	ANEXOS	66

1 INTRODUÇÃO

O Brasil se consolidou no cenário agrícola mundial como um dos maiores produtores de grãos do mundo e ainda se encontra em ascensão. Em 2020, a produção de grãos (incluindo cereais, leguminosas e oleaginosas) foi de 243,2 milhões de toneladas, 2,2% superior à safra de 2019, que foi de 241,4 milhões de toneladas (IBGE, 2020). São números significativos para um país que, até a década de 1970, era importador de alimentos, principalmente pela baixa tecnologia do setor, pouco conhecimento sobre seus solos tropicais e sua resposta às aplicações de fertilizantes, pela incapacidade de desenvolver variedades de alto rendimento adaptadas a esses solos, manejo inadequado, e pela falta de políticas agrícolas voltadas para o desenvolvimento da produção e produtividade (SCHUH, 1971).

Em relação à soja, o país foi o maior produtor mundial do grão na última safra 2020/21 com produção de 135,4 milhões de toneladas, seguido pelos Estados Unidos com 112,5 milhões de toneladas. Com dimensões continentais, solos e climas variados, uma das principais razões à expansão da produção brasileira de grãos foi a adaptação de áreas sem história de produção, denominadas novas fronteiras agrícolas. Uma das mais recentes e bem-sucedida é conhecida como MATOPIBA (sigla para os estados brasileiros onde está localizada: Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia). Somente entre 1996 e 2006, a produção de soja cresceu mais de 280% na MATOPIBA (ARAÚJO et. al., 2019). O aumento da produtividade na MATOPIBA deve-se, entre outros fatores, às extensas áreas planas, alta insolação e sazonalidade da precipitação, concentrada entre 4 e 5 meses. No entanto, a evolução recente da agricultura de precisão e a riqueza trazida pelo agronegócio com a consequente mudança no uso e ocupação do solo (BORGHI et. al., 2016) também trouxeram mudanças no clima (SALVADOR e BRITO, 2018; REIS et. al., 2020). Nesse cenário, uma nova fronteira agrícola com alto potencial de produção de grãos surge no Brasil, chamada SEALBA (sigla dos estados brasileiros que a compõem: Sergipe (SE), Alagoas (AL), e Bahia (BA)).

A maior parte da produção agrícola na SEALBA vem da agricultura familiar e de subsistência, prática associada a agricultores de baixa renda que empregam pouca ou nenhuma tecnologia, que cultivam principalmente milho, feijão e mandioca. A precipitação é o principal fator limitante para o sucesso/fracasso da produção, diretamente responsável pelo aumento da umidade do solo, afetando todas as áreas cultiváveis do planeta, que podem ser monitoradas por índices que expressam o vigor vegetativo (SHEN et. al., 2014; WANG et. al.,

2022). Na SEALBA Hirakuri et. al., (2016), verificou-se que a produtividade do feijão é até 70% inferior ao observado em estados da região sul do Brasil; por outro lado, a introdução de culturas como a soja pode trazer ganhos socioeconômicos consideráveis para produtores (PROCÓPIO et. al., 2019).

A soja é uma planta resistente ao estresse hídrico, desde que essa condição não ocorra em estágios críticos do ciclo da planta. Assim, é importante o estudo da ocorrência de déficit hídrico em diferentes fases fenológicas da soja. De acordo com Tavares, et. al., (2013), a deficiência hídrica no início do ciclo da soja causa forte redução na emissão de novos ramos reduzindo potencialmente o número de nós que iriam produzir legumes. Porém a planta pode se recuperar parcialmente, a depender da disponibilidade de água (precipitação, evaporação e irrigação) após o florescimento, sendo capaz de emitir e fixar um número maior de flores nos novos nós para produzir legumes, podendo ainda reduzir a formação de novas folhas para sustentar o enchimento de grãos. O manejo da cultura associado à irrigação em períodos de déficit hídrico nas fases fenológicas de desenvolvimento vegetativo, da floração ao início da frutificação e maturação, pode atender às necessidades hídricas da planta e com isso otimizar a produção.

Neste contexto, as necessidades hídricas da soja para a obtenção do máximo rendimento, variam entre 450 e 850 mm por ciclo, compreendendo entre o estágio fenológico de desenvolvimento da planta, atingindo ao máximo durante a floração e o enchimento dos grãos, decrescendo após esse estágio (TECNOLOGIAS, 2003). Em termos de melhor época para plantio da soja, além do regime de precipitação/irrigação a planta se mostra sensível à duração das horas de luz do dia, florescendo quando o comprimento dos dias é inferior a determinado valor, denominado fotoperíodo crítico (CÂMARA, 1998). No entanto, segundo Rodrigues et. al., (2001), a sensibilidade fotoperiódica da soja varia com o genótipo e, nas cultivares mais sensíveis, a resposta ao fotoperíodo é quantitativa e não absoluta, o que significa que a floração ocorrerá de qualquer modo. De acordo com Câmara (1998), a melhor época teórica de semeadura da soja em qualquer região apta ao seu cultivo situa-se entre 30 (21 de novembro) e 45 dias (6 de novembro) antes do solstício de verão (21 de dezembro), pois possibilita tempo suficiente para a planta desenvolver-se com altura e porte compatíveis com elevada produtividade e colheita mecânica.

A soja tem dois períodos críticos bem definidos com relação à falta de água: da semeadura à emergência e no enchimento dos grãos. Durante a germinação, tanto o excesso como a falta de água são prejudiciais ao estabelecimento da cultura. Durante esse período,

excessos hídricos são mais limitantes que déficits (SALINAS et. al., 1989). A ocorrência de déficit hídrico durante o período de enchimento dos grãos é mais prejudicial do que durante a floração (DOSS et. al., 1974; SIONIT e KRAMER, 1977). Como o consumo de água pela cultura da soja depende, além do estágio de desenvolvimento, da demanda evaporativa da atmosfera, o seu valor absoluto pode variar, tanto em razão das condições climáticas de cada região como em função do ano e da época de semeadura (condições de tempo) na mesma região climática (FAVERO, 2014 apud BERGAMASCHI et. al., 1992). Para o Sul do Brasil, Bergamaschi et. al., (1989) apud Berlato et. al., (1986), obtiveram valores médios de evapotranspiração máxima (ETM) ao redor de 6 mm/dia, sendo o menor consumo verificado no início do ciclo (2,7 mm/dia) e o maior ocorrendo do início da floração ao início do enchimento de grãos (7,5 mm/dia). Para todo o ciclo da cultura, foi obtida uma ETM de 827 mm. Azevedo et. al., (1989), obtiveram para as condições semiáridas do Nordeste brasileiro, uma ETM da cultura da soja de 620 mm, para todo seu ciclo.

Diante das questões levantadas sobre déficit hídrico e eficiência da produção agrícola, faz-se necessário avaliar as condições edafoclimáticas ideais para o cultivo da soja, que possibilitem a identificação de áreas promissoras para o cultivo eficiente, ou seja, realizar um zoneamento com características climáticas (precipitação e evapotranspiração) e de solo propícias a otimizar ao máximo a produção da soja.

Portanto, o zoneamento voltado para as atividades agrícolas podem ser divididos em quatro categorias: Zoneamento Agroclimático; Zoneamento Agrícola; Zoneamento Agroecológico ou Edafoclimático; e Zoneamento de Riscos Climáticos; Zoneamento Agroclimático é a delimitação da aptidão das regiões de cultivo quanto ao fator clima em escalas macroclimáticas e regionais. O Zoneamento Agrícola, por sua vez, leva em consideração, além dos elementos do clima, a associação de fatores ou critérios como o solo (zoneamento edáfico), e o meio socioeconômico, com o intuito de organizar a distribuição racional das culturas economicamente rentáveis, respeitando as características sociais e culturais de cada região. O Zoneamento Edafoclimático, é considerado um estudo de complementação da potencialidade natural de determinada região para dada cultura, no qual, além do clima, inserem-se no estudo os aspectos edáficos ou pedológicos. Já no zoneamento de risco climático, além das variáveis analisadas (clima, solo e planta), aplicam-se funções matemáticas e estatísticas (frequência e probabilidade) com o objetivo de quantificar o risco de perda das lavouras com base no histórico de ocorrência de eventos climáticos adversos, principalmente a seca e chuvas em excesso (WOLLMANN e GALVANI, 2013).

O conhecimento detalhado do clima em áreas de intensa produção agrícola é fundamental para fins de planejamento. Conforme observado nos estudos da região da MATOPIBA, a inexistência de dados observados contínuos, de longo prazo e sem falhas, e sua distribuição temporal precisa ser abordada. Entre as variáveis meteorológicas observadas na superfície, a precipitação é a de maior importância, principalmente para a agricultura. Existem poucas estações meteorológicas na SEALBA.

Vale destacar que o Brasil sofre continuamente com o fechamento gradual das estações meteorológicas (CARVALHO, 2020), e a comparação de dados observados nestas estações com dados de reanálises em grade para avaliar seu desempenho é uma necessidade não apenas no Brasil, mas em nível global (BECK et. al., 2017; JIAO et. al., 2021). Diante da perspectiva cada vez mais presente de realizar estudos climáticos e gerar produtos para a tomada de decisão com base nessas fontes de informação, a necessidade deste estudo justifica-se mais uma vez para uma área do Brasil que poderá em breve consolidar-se como o maior do mundo em produção de grãos. Além disso, pretende-se que tais análises ajudem na validação de produtos do banco de dados de observação de superfície do Global Atmospheric Model (BAM) (FIGUEROA et. al., 2016), que é o módulo atmosférico do Modelo do Sistema Terrestre Brasileiro (BESM), com o objetivo de obter um acoplamento dinâmico-estatístico híbrido para a superfície observada e fazer ajustes em produtos de previsão sazonal de BAM a NEB, com ênfase em SEALBA.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Identificar as melhores épocas de plantio para a cultura da soja, a fim de minimizar as perdas decorrentes da escassez de chuva na região SEALBA.

1.1.2 Específicos

- 1 **COMPARAR** os dados de precipitação das diferentes bases de dados com as estações meteorológicas convencionais;
- 2 **DETERMINAR** a base de dados que melhor representa o regime de precipitação da região da SEALBA;
- 3 **REALIZAR** um zoneamento agroclimático para identificar a melhor época de semeadura da soja;

- 4 **GERAR** um calendário de cultivo para a cultura da soja na região da SEALBA, a fim de minimizar as perdas provenientes da escassez hídrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da soja

O complexo soja tem contribuído com um superávit considerável na balança comercial brasileira. A contribuição indireta da cultura da soja na movimentação da economia, embora não tão facilmente mensurável, é de vital importância para o desenvolvimento do país, seja pela geração de empregos, seja pela adição de valor à soja industrializada.

O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de soja, sendo os estados do Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul os maiores produtores nacionais de grãos dessa leguminosa. De acordo com os dados disponibilizados pelo 1º levantamento da safra de grãos 2021/2022 da CONAB (2022), estima-se uma produção de 140,8 milhões de toneladas de soja, número que representa um aumento de cerca 2,5% em relação à safra anterior. A produção de soja no país representa 50% da produção geral de grãos, o que evidencia a importância da cultura na agricultura brasileira.

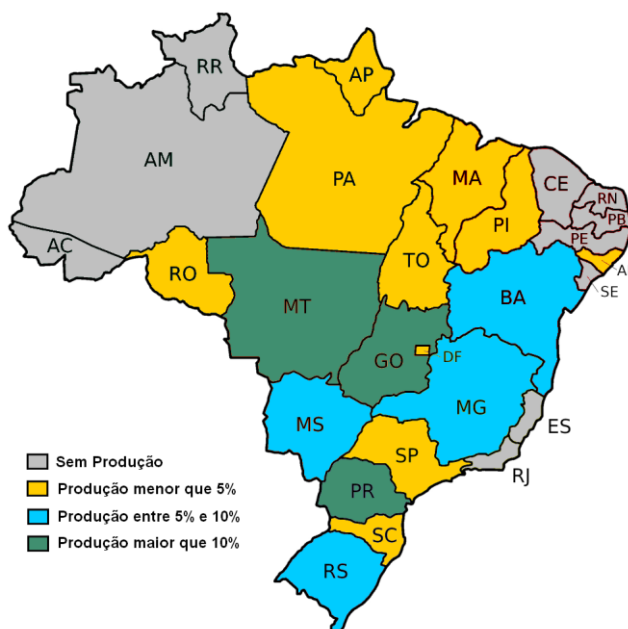


Figura 1: Classificação dos estados produtores de soja no Brasil.

Fonte: Portal de Informações da CONAB, Grãos.

O clima é o principal fator responsável pelas oscilações e frustrações das safras agrícolas no Brasil. Diversas análises da produção agrícola apontam alta correlação entre variações de safras das principais culturas e as condições meteorológicas e climáticas. Em geral, as condições hídricas são as que mais afetam a produção das lavouras (MONTEIRO, 2009).

A soja tem dois períodos críticos bem definidos quanto à falta de água: da sementeira à emergência e no enchimento dos grãos. Durante a germinação, tanto o excesso como a falta de água são prejudiciais ao estabelecimento da cultura (SALINAS et. al., 1989). Já a ocorrência de déficit hídrico durante o período de enchimento dos grãos é mais prejudicial do que durante a floração (DOSS et. al., 1974; SIONIT e KRAMER, 1977; FARIAS et. al., 2001).

A necessidade de água na soja aumenta com o desenvolvimento da planta, atingindo o auge durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia), decrescendo após essa fase. Para a obtenção de rendimentos satisfatórios, a soja necessita entre 450 a 800 mm de água durante seu ciclo, em função das condições edafoclimáticas, do manejo da cultura e do ciclo da cultivar (FARIAS et. al., 2007).

O déficit hídrico, normalmente, é o principal fator responsável por perdas na lavoura. A exemplo da seca ocorrida nas safras 1977/1978 e 1978/1979, nos três estados da Região Sul (perdas médias de 32% ao ano), deixou-se de colher cerca de 7,2 milhões de toneladas de grãos de soja, o que representa, em valores atuais, aproximadamente 1,5 bilhões de dólares (FARIAS et. al., 1993; FARIAS et. al., 2001).

Quanto às exigências térmicas, a soja se adapta melhor às regiões onde as temperaturas oscilam entre 20°C e 30°C, sendo a temperatura ideal em torno de 30°C. A sementeira da soja não deve ser realizada em períodos com temperatura abaixo dos 20°C, pois a germinação e a emergência da planta ficam comprometidas. A floração da soja somente é induzida quando ocorrem temperaturas acima da temperatura base, que varia de cultivar para cultivar (FARIAS et. al., 2007).

A adaptação da soja a determinadas regiões depende das exigências hídricas, térmicas e das necessidades fotoperiódicas. Tais condições variam de acordo com o cultivar e a latitude. Variedades que apresentam a característica “período juvenil longo” possuem adaptabilidade mais ampla, possibilitando seu cultivo em diversas latitudes e em diferentes épocas de plantio (FARIAS et. al., 2007).

Existem diversas variedades do cultivar da soja para a região do nordeste brasileiro. A EMBRAPA, nos anos de 2013 a 2017, fez um estudo para avaliar e determinar as melhores variedades adaptadas à região SEALBA. Contudo, o estudo também determinou que sua produção está intimamente ligada à disponibilidade de água no solo, além da fertilidade (PROCÓPIO et. al., 2018).

O ciclo médio para a produção da soja é de 120 dias, sofrendo algumas mudanças a depender do tipo da variedade: precoce (até 109 dias), média (110 a 120 dias) e tardia (maior que 120 dias), partindo do plantio até o momento de colheita (PROCÓPIO et. al., 2018). No estudo apresentado pela EMBRAPA, apontaram-se algumas variedades que melhor se adaptaram ao nosso clima nordestino e suas condições hídricas. O mesmo foi realizado em 3 (três) municípios: Paripiranga-BA, Frei Paulo-SE e Cariri-SE, e obteve-se uma produtividade superior à média nacional, chegando a 400 kg ton^{-1} (PROCÓPIO et. al., 2018).

A época de plantio no Brasil varia de acordo com a região produtora, sendo em sua maioria de Outubro a Dezembro, com algumas variações a depender da localidade, a exemplo da região oeste do Pará, onde é recomendado o plantio nos meses de Março a Abril (REIS, 2020).

2.1 Modelo agrometeorológico

Os modelos agrometeorológicos são ferramentas de grande potencial que permitem simulações para diferentes cenários, tais como: época de plantio, influência do clima na produção, escolha da variedade ideal, etc. Desta forma, pode-se estudar os impactos das variáveis climáticas na agricultura sem a necessidade de uma área física de plantação, permitindo um controle das variáveis climáticas (MOARES, 1998).

Os modelos de simulação de culturas são utilizados para auxiliar nos experimentos convencionais, sendo alternativa ao experimento de campo. A vantagem dos modelos em relação aos experimentos de campo está na facilidade e velocidade de execução: enquanto um experimento demora dias, meses ou anos para obter algum resultado, a simulação com modelos reduz drasticamente o tempo. Assim podemos identificar outras vantagens: diminuição dos custos, pois os experimentos a campo possuem elevado custo de instalação, manutenção e obtenção de dados; maior quantidade de informações extraídas, vez que nos experimentos de campo as informações se restringem aos parâmetros avaliados; criação e suposição de cenários ideais que ainda não são conhecidos, sendo impossível em condições

experimentais, mesmo estes sendo cuidadosamente executados (REIS et. al., 2020 apud CORRÊA et. al., 2011).

De acordo com Vianna et. al., (2017), o modelo agrometeorológico consiste em equações matemáticas, empíricas ou mecanísticas, com o objetivo de recriar as condições reais representando o desenvolvimento das plantas, de modo a permitir avaliar os fatores que influenciam o seu desenvolvimento. Streck e Alberto (2006) reafirmam que os modelos matemáticos são uma simplificação da realidade que relacionam as complexas interações existentes no agroecossistema, tornando possível o estudo dos impactos de mudanças no clima de uma determinada região. Um modelo agrometeorológico matemáticos representa sistemas quantitativos possibilitando avaliar com maior precisão os seus resultados; modelo agroclimático empírico consiste em representar a relação já conhecida dos componentes do sistema, onde estas relações são controladas, gerando um resultado que só é validos quando as condições de contorno aplicadas são as mesma para todo o sistema, a exemplo de cultivares, clima, manejo, etc. Já o modelo agroclimático mecanístico é o mais complexo, pois, representa a interação existente entre os componentes do sistema que influenciam no comportamento do sistema, criando condições diferentes a depender da inter-relação destes componentes.

Neste estudo será adotado o modelo agrometeorológico empírico, visto que a abordagem visa avaliar a influência do déficit hídrico na produtividade da soja na região SEALBA, sem considerar as diversidades de micro regiões alusivas a tipo e estrutura física de solo, fertilidade, salinização e manejo de combate a pragas e doenças.

Os modelos agrometeorológicos são utilizados para caracterizar os efeitos climáticos sobre a produtividade das culturas. Isto se faz necessário em razão de a agricultura ser uma das atividades econômicas e sociais mais afetadas pelas condições meteorológicas. Excessos ou déficits de precipitação, ondas de calor ou frio, geadas, ventanias e granizo são bons exemplos de fatores limitantes das safras. Na literatura, é recorrente referenciar o proposto por Doorenbos e Kassam (1979), quando se trata de estimar a produtividade agrícola das culturas. Este modelo procura explicar o efeito das variáveis meteorológicas, precipitação e ETP na produtividade da cultura, relacionando a perda de rendimento de culturas com o déficit hídrico, sendo comumente utilizado para gerar estimativas de perdas (SILVA, 2014).

Já Farias et. al., (2001) e Ribeiro da Silva et. al., (2013) afirmam em seus estudos que os rendimentos das safras estão inter-relacionados com o déficit hídrico, posicionamento

reforçado por Sentelhas et. al., (2016). Também há o estudo de Ferreira e Rao (2011), que quantificaram a influência da variabilidade das chuvas e temperaturas na produção de soja da região sul do Brasil, utilizando três diferentes adaptações do modelo conceitual de Doorenbos e Kassam (1979). Estes últimos verificaram que o rendimento da soja é mais afetado pelas temperaturas de verão, pelas chuvas no início e pico de desenvolvimento das plantações e, o mais importante, que no Paraná as plantações de soja são mais sensíveis às variações da chuva, enquanto no Rio Grande do Sul às variações da temperatura.

2.2 Clima na SEALBA

No litoral Leste do Nordeste do Brasil, especificamente na região da SEALBA, o semestre mais chuvoso, de Março a Agosto, concentra mais de 75% da precipitação total anual. O principal sistema causador das chuvas consiste nos Distúrbios Ondulatório de Leste (DOLs), que são grandes massas de nuvens que se deslocam do Oceano Atlântico em direção ao continente, ocasionando chuvas intensas no litoral e atingindo de forma mais amena o interior do continente - até 200 km, aproximadamente (GOMES et. al., 2015; GOMES et. al., 2019). De acordo com a (PROCÓPIO, et. al., 2019), o acumulado anual médio de precipitação na SEALBA varia de 600 a 1700 mm, a depender da proximidade com o oceano Atlântico.

A circulação de brisa é um dos principais mecanismos reguladores do regime de chuvas do leste do Nordeste Brasileiro (NEB), cuja intensidade é modulada por circulação de grande escala (ESTOQUE, 1962; LAIRD, et. al., 2001) e efeitos de topografia e uso do solo (MCPHERSON, 1970; BAKER, et. al., 2001; MIAO, et. al., 2003; KALA, et. al., 2010). Ainda dando enfoque ao leste do NEB, Oliveira Júnior, et. al., (2021), constatou em seu estudo sobre a climatologia para a cidade de Maceió/AL (situada dentro da SEALBA) para o período de 1979 à 2013, que a estação chuvosa (ou quadratura chuvosa), corresponde a Abril a Julho e foi responsável por 59,52% da chuva, seguido da estação seca (Outubro a Fevereiro), com 17,20% da chuva e a estação de transição (Março, Agosto e Setembro) correspondente a 23,28% da chuva no período de estudo.

Para o NEB de modo geral, o regime pluviométrico depende da atuação de sistemas atmosféricos em diferentes escalas de tempo e espaço, a exemplo da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), dos vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), dos Sistemas Frontais (SF), DOLs, Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), convecção organizada em forma de linhas de instabilidade e aglomerados convectivos (UVO e NOBRE, 1989;

MOLION e BERNADO, 2002; COUTINHO, et. al., 2010; REBOITA, et. al., 2010; COSTA 2010; NÓBREGA e SANTIAGO, 2014; ASSIS et. al., 2015).

A SEALBA possui como vantagens climáticas a ocorrência de chuvas em volumes superiores a 450 mm no período de Abril a Setembro em pelo menos 50% da área total dos seus municípios, volume de precipitação suficiente para o cultivo de diversas culturas de grãos, além da componente térmica que é fundamental para que se alcance a produção máxima atingível por uma cultura (SENTELHAS et. al., 2016).

Todavia, importa salientar a escassez de estações meteorológicas nessa região e a ocorrência significativa de falhas nos dados com a existência de estações meteorológicas automáticas (EMA) e convencionais (EMC), o que também foi constatado por Oliveira Júnior et. al., (2021), em particular os autores utilizaram a base de dados CHELSA (*Climatologies at High resolution for the Earth's Land Surface Areas*). Todas as variáveis meteorológicas são de extrema importância para estudos de natureza agrometeorológica, que permitem, por exemplo, o cálculo da evapotranspiração potencial pelo método científico mais preciso que é o de Penman-Monteith (PENMAN, 1956). No entanto, entre todas as variáveis, a precipitação é sem dúvida uma das mais importantes para o desenvolvimento das culturas e para modelar a dinâmica da produtividade.

Para minimizar os efeitos relacionados à baixa densidade de observações (CARVALHO, 2020), uma série de produtos de análises gradeadas de precipitação vem sendo desenvolvida, e tem por base a junção do maior número possível de observações pluviométricas de superfície ou de estimativas por satélites, ou, ainda, a junção de observações de superfície e obtidas por sensores orbitais (JOYCE et. al., 2004; FUNK et. al., 2015; XAVIER et. al., 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A SEALBA é uma área contínua e interligada de municípios de três estados da parte leste do NEB, região historicamente ligada à produção de cana-de-açúcar desde o início da ocupação europeia no Brasil. Segundo Procópio et. al., (2016), 33,2% de sua área está localizada em Sergipe (1.707.815 ha), 36,1% em Alagoas (1.859.438 ha), e 30,7% na Bahia

de 18 (1.581.688 ha), totalizando 5.148.941 ha. A SEALBA é composta por 171 municípios, 69 dos quais estão localizadas em Sergipe, 74 em Alagoas e 28 no nordeste da Bahia.

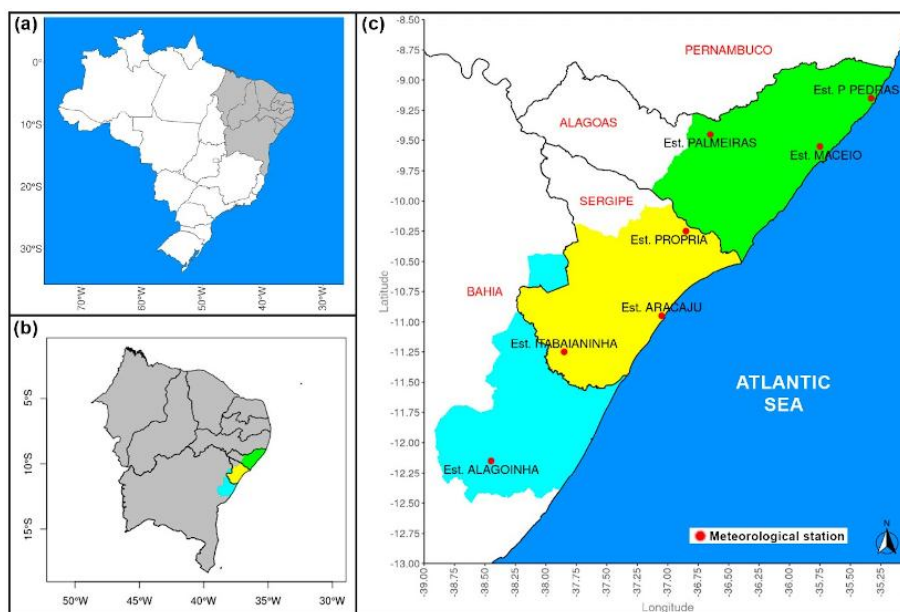


Figura 2. (a) Mapa do Brasil com a região Nordeste em cinza, (b) mapa do nordeste do Brasil com os estados de Sergipe, Alagoas e Bahia em destaque e (c) destacando a localização da SEALBA com os devidos recortes municipais. Os círculos vermelhos representam os municípios com estações meteorológicas do INMET.

Fonte: Autor.

A Figura 2 mostra a localização da SEALBA e sua área em relação à extensão territorial brasileira. É uma zona de baixo relevo, com algumas zonas de montanha que ultrapassam os 400 m de altura. Na maior parte da região, as altitudes mal ultrapassam o nível médio do mar. A estação chuvosa da SEALBA ocorre geralmente entre os meses de Março a Julho compreendendo as estações climáticas de outono e inverno, sendo responsável por 60% do total de chuvas do ano. Tem-se, ainda, um grande número de rios, lagoas, etc. presentes ou que banham esta porção da parte leste do NEB. A SEALBA tem 32% de seu território localizado na fronteira do semiárido brasileiro, com menor índice pluviométrico do que no extremo leste. Entre as vantagens desta região, está a proximidade de dois portos, localizados em Alagoas e Sergipe, e outros dois portos na Bahia, além da malha viária que facilita o escoamento da produção agrícola.

3.2 Dados

Em toda a SEALBA, existem apenas sete estações meteorológicas convencionais/manuais com dados históricos de 1961 operados pelo Instituto Nacional de

Meteorologia (INMET): três na porção SEALBA de Alagoas (AL), três em Sergipe (SE) e um na Bahia (BA), cujos metadados estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Descrição das Estações Meteorológicas Convencionais localizadas na região da SEALBA. Fonte: INMET.

Cidade	UF	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Maceió	AL	-9,67	-35,70	64,50
Palmeira dos Índios	AL	-9,45	-36,70	274,90
Porto de Pedras	AL	-9,18	-35,43	50,02
Aracajú	SE	-10,95	-37,05	4,72
Itabaianinha	SE	-11,27	-37,79	208,00
Propriá	SE	-10,21	-36,84	19,92
Alagoinhas	BA	-12,15	-38,43	130,92

Fonte: Autor.

O período de estudo compreende o intervalo de 20 anos, de 2001 a 2020, baseado em estimativas diárias de precipitação provenientes dos sistemas MERGE, CHIRPS, ERA5 e ERA5-Land, comparadas às observações *in situ* das estações meteorológicas automáticas e convencionais do INMET para o mesmo período. Os dados das estações do INMET foram submetidos ao tratamento para eliminação de falhas, que consistiu em descartar todos os registros os quais continham qualquer tipo de inconsistência. O total de registros eliminados foi de 2.633, equivalente ao percentual de 5,15% dos registros coletados. Cada uma das bases de dados será descrita em detalhes a seguir.

3.2.1. MERGE

O MERGE (ROZANTE et. al., 2010; 2020) consiste na combinação de dados observados em redes pluviométricas operadas por diferentes agências brasileiras com dados do satélite GPM-IMERG-EARLY (HUFFMAN et. al. 2015), após a descontinuidade do TRMM-TMPA (MICHOT et. al., 2018). Os dados MERGE são disponibilizados pelo CPTEC/INPE em formato diário para toda a América do Sul com resolução de 10 Km (ROZANTE et. al., 2010; 2020). Os dados diários do MERGE estão disponíveis desde 1º de Janeiro de 2000, em: <http://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/MERGE/GPM/DAILY/>.

3.2.2. CHIRPS

Os dados do CHIRPS provêm dos esforços de instituições norte-americanas para mapear a chuva, especialmente em áreas com escassas observações de superfície e em áreas de terreno complexo, como cadeias montanhosas (FUNK et. al., 2015). O CHIRPS utiliza todos os dados de uma rede de observações à superfície para construir uma malha de alta

resolução, em conjunto com estimativas de precipitação baseadas em observações por satélites na banda do infravermelho a partir da duração das nuvens frias (HUFFMAN et. al., 2007). Os dados gerados por satélites são então combinados às observações de superfície do Sistema de Telecomunicações Global (GTS) da Organização Meteorológica Mundial (WMO) e são reamostrados em uma grade de $0,05^\circ$, levando em consideração as características fisiográficas da superfície. Os dados CHIRPS estão disponíveis em diferentes resoluções, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ e $0.05^\circ \times 0.05^\circ$, desde 1981 até o ano de 2020.

3.2.3. Dados de Reanálise

Uma outra alternativa para contemplar com dados áreas com rede de observações de superfície escassas é a utilização de reanálises. Saurral et. al., (2016) e mais recentemente Carvalho et. al., (2020), mostram que toda a América do Sul, e em especial o Brasil, sofreram uma significativa redução no número de estações meteorológicas, muitas sendo definitivamente fechadas, o que força a utilização de fontes alternativas de dados como as provenientes de reanálises, que fornecem uma base de dados sintéticos reconstruída para períodos retrógrados, a partir da calibração de modelos climáticos. Estes dados precisam ser analisados a partir da comparação com as observações históricas e precisam demonstrar parâmetros estatísticos similares aos das observações, como médias e variâncias (SHEFFIELD et. al., 2006). Nessa pesquisa foram avaliadas as duas versões mais recentes das reanálises do ECMWF, ERA5 e ERA5-Land, descritas brevemente a seguir.

3.2.3.1. ERA5 e ERA5-Land

O ERA5 é a quinta geração de reanálises atmosféricas produzidas pelo ECMWF, substituindo as anteriores ERA-Interim (DEE et. al., 2011) e ERA-40 (UPPALA et. al., 2005). Seu período de cobertura é de 1950 aos dias atuais, com saídas horárias em uma grade com resolução espacial de 31 km. O ERA5 utiliza o esquema de assimilação de dados 4D-Var baseado no the Integrated Forecasting System (IFS) Cy41r2, operacional desde 2016. Em estudo de Hersbach et. al., (2020), foi constatado um aumento na correlação média global da precipitação de 10% em relação aos dados do Global Precipitation Climatology Project (GPCP).

Já o ERA5-Land representa uma evolução do ERA5, descrevendo em maiores detalhes os ciclos de água e energia em um menor espaçamento de grade, de 9 km, e também com frequência temporal horária (MUÑOZ-SABATER et. al., 2021). Avaliações preliminares demonstraram maior qualidade do ERA5-Land na representação da temperatura a 2 metros,

umidade do solo e escoamento de rios. No entanto, apesar de poder-se inferir melhorias na representação da precipitação em superfície, isto não é uma garantia e avaliar sua performance em diferentes locais do globo sob diferentes condições climáticas, como na região da SEALBA, é necessário.

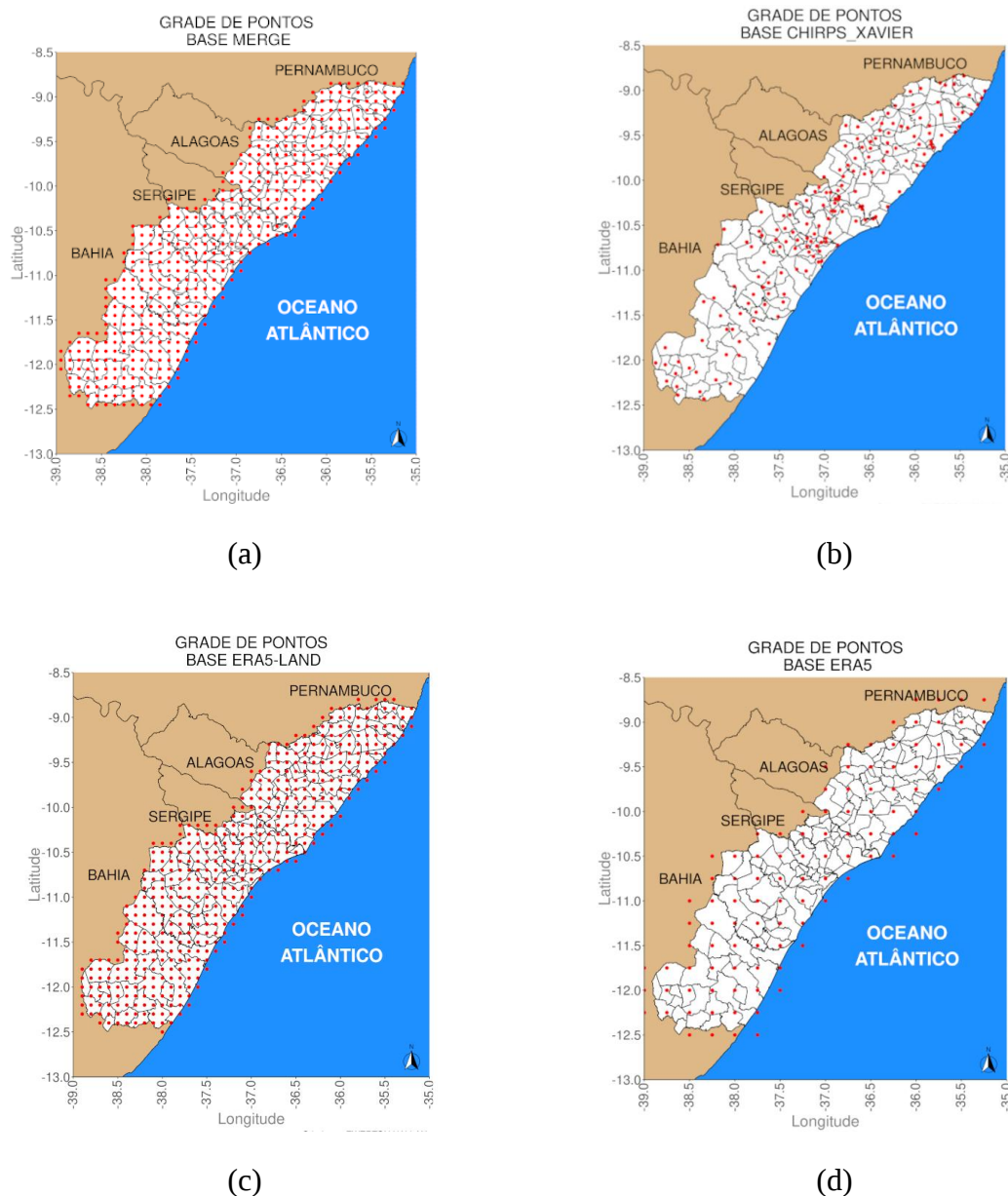


Figura 3: Grade de ponto para cada base de dados para região SEALBA, (a) base de dados MERGE, (b) base de dados CHIRPS, (c) base de dados ERA5-Land e (d) base de dados ERA5.

Fonte: Autor.

Diante das diferenças de resolução e dos pontos de grade das diversas bases de dados, faz-se necessário a padronização destas grades a fim de possibilitar um comparativo entre as

mesma. Deste modo, foi realizada a interpolação com base no ponto médio mais próximo, tendo como referência a base de dados MERGE de maior resolução.

3.3 Avaliação estatística

Devido à baixa densidade de estações e à impossibilidade de extrapolar os dados desta rede de estações, a comparação entre os dados observados e cada análise/reanálise de grade baseia-se na extração das séries temporais sintéticas de cada base da mesma geografia/coordenadas das estações. Como as resoluções espaciais são variadas e qualquer grade sempre fornece quatro pontos em torno de um ponto de interesse (estação meteorológica), cada série sintética foi extraída pelo método de interpolação bilinear simples (ROCHA JÚNIOR et. al., 2019). Este método calcula um valor da variável em um ponto de grade específico, atribuindo pesos característicos a cada um dos quatro pontos da grade em relação à localização real da estação meteorológica, com pesos maiores quanto mais próximo o ponto da grade estiver do ponto de interesse (LIU et. al., 2015). Essa verificação quantitativa entre o ponto de grade de precipitação × ponto de grade e/ou ponto de grade × observação real é usada em muitos estudos que atestaram sua eficácia (MICHOT et. al., 2018; DERMIRTAS et. al., 2005; RODRIGUES et. al., 2021). O erro absoluto médio (MAE, Equação (1)) e o erro quadrático médio (RMSE, Equação (2)) foram usados para avaliar a precisão dos bancos de dados (FU et. al., 2011; WU et. al., 2018). O coeficiente de correlação de Pearson (r , Equação (3)) foi usado para identificar a relação de variabilidade entre precipitação observada × precipitação da (re)análise (COSTA et. al., 2021). Todas as análises estatísticas foram realizadas usando o software livre R em sua versão 4.0.3.

$$MAE = \frac{1}{N} + \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$r = \frac{Cov(o,p)}{\sigma(o,p)} \quad (3)$$

onde N é o número total de elementos na série, P_i = precipitação da grade análise/reanálise, O_i = observações em cada tempo i , $Cov(o, p)$ é a covariância entre os dados, e $\sigma(o, p)$ são os respectivos desvios padrão.

Para garantir que o valor de r realmente expresse a concordância entre as observações e (re)análises, o teste t de Student paramétrico (AL-ACHI et. al., 2019) foi usado para verificar a significância das correlações com intervalo de confiança de 99% (p -valor $< 0,01$). Uma premissa para o teste é que o tamanho da amostra, N , a partir do qual o valor do coeficiente de correlação, r , é obtido, é igual ou maior que 6. Dessa forma, o valor de t é dado pela equação:

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{(1 - r^2)}{(N - 2)}}} \quad (4)$$

A equação (4) é uma distribuição para t com $N - 2$ graus de liberdade. Aplicando essa fórmula para qualquer valor de r , N testará a hipótese nula de que o valor observado vem de uma população na qual não há correlação significativa entre os dados. Uma vez que o valor de t é obtido, o coeficiente de correlação crítica (r_c) pode ser extraído um valor para qual a hipótese estatística de que existe uma correlação entre o simulado e o observado os dados são aceitos ou não, r_c é dado pela Equação (4).

$$r_c = \sqrt{\frac{t^2}{(N - 2) + t^2}} \quad (5)$$

Como os períodos de dados diferem entre as fontes, 1961 até o presente (INMET), 2000 até o presente (MERGE), 1981 até o presente (CHIRPS) e 1979 (1950) até o presente (ERA5 e ERA5-Land), todas as análises comparativas foram realizadas para o período em comum entre todas as fontes de dados: 2001 a 2020, obtendo sempre como variável de referência a precipitação observada no pluviômetro da estação meteorológica do INMET.

3.4 Modelo agrometeorológico de penalização por deficiência hídrica

O modelo proposto por Doorenbos e Kassan (1979) estabelece a penalização do rendimento agrícola a partir da deficiência hídrica no decorrer das fases fenológicas da cultura. Esse modelo foi escolhido para o presente estudo, pois a maior parte das perdas agrícolas no NEB se dá por secas e/ou estiagens prolongadas, não apenas no semiárido (ALVALA et. al., 2017).

O modelo é composto por dois módulos: um que estima a produtividade potencial da safra ou produtividade máxima, e outro que estima o decréscimo do potencial de

produtividade em função do déficit hídrico. Para este estudo adotaremos a estimativa potencial de produção.

O modelo possui algumas limitações para estimar a produção potencial, pois não considera a relação entre componentes do sistema, como fertilidade e umidade, tipo de solo e teor de matéria orgânica, etc. Mesmo sendo mais genérico, busca simular o desenvolvimento da cultura baseado nas relações hídricas do sistema solo-planta-atmosfera (VIANNA et. al., 2017).

O passo de tempo do modelo é decendial e as únicas entradas são a precipitação e a evapotranspiração potencial (ETP). A Evapotranspiração Real da Cultura (ETR) e o coeficiente de penalização por déficit hídrico (K_y), são provenientes do balanço hídrico para o ciclo da cultura, mostrados na equação 6.

$$Yd = \left(1 - \frac{ETR}{ETC}\right) \times K_y \times 100 \quad (6)$$

As de equações 7 a 12 mostram os estágios anteriores necessários para que se chegue aos resultados obtidos pela equação 6. Como já comentado, nestes cálculos assumiu-se um ciclo da cultura de 120 dias. Este ciclo contém os coeficientes da cultura (K_c) e de penalização hídrica (K_y) com valores diários. O cálculo da evapotranspiração da cultura (ETC) depende de um valor para o K_c , e a ETR depende de um coeficiente de umidade para o solo. Já o K_s é calculado conforme o manual de irrigação de Salassier et. al., (2008).

$$ETC = ETP \times K_c \quad (7)$$

$$ETR = k_s \times ETP \times K_c \quad (8)$$

$$k_s = \frac{\log(ARM + 1)}{\log(ARM_c)} \quad (9)$$

$$CAD = \frac{K_c}{K_{c_{max}}} \times CAD_{max} \quad (10)$$

$$ARM = ARM_{ant} - ETR + Precipitação \quad (11)$$

$$ARM_c = (1 - p) \times CAD \quad (12)$$

em que: ETP = evapotranspiração; ETC = evapotranspiração da cultura; CAD = capacidade de campo; ARM = armazenamento de água no solo; ARM_c = armazenamento crítico (a partir do qual a planta perde produtividade); ARM_{ant} = armazenamento anterior; p = fator de

disponibilidade, tabelado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO); k_s = coeficiente de umidade; K_c = coeficiente de cultura; K_{cmax} = máximo coeficiente de cultura. O ARM nunca pode ser maior do que a CAD.

A CAD é definida como a quantidade máxima de água que o solo pode armazenar na profundidade explorada pelo sistema radicular da planta a uma profundidade média de atuação do sistema radicular de 60 cm. Desta forma adotou-se um valor de 70 mm para o CAD utilizado nesse estudo, baseado no que foi determinado no estudo de Cantarelli (2019).

Os principais dados de entrada para esse modelo são: chuva diária, evapotranspiração potencial decendial, coeficientes de cultura, duração do ciclo e das fases fenológicas da cultura e capacidade de água disponível do solo em função do sistema radicular. Para a definição dos níveis de risco hídrico, foram estabelecidas três classes, de acordo com a relação ETR/ETC estipulada com base em Farias et. al., (2001):

- favorável ($ETR/ETC \geq 0,70$);
- intermediária ($0,70 > ETR/ETC \geq 0,50$) e
- desfavorável ($ETR/ETC < 0,50$).

De forma geral, de acordo com Allen et. al., (1998) as culturas anuais possuem 4 (quatro) fases de crescimento. E especificamente para a cultura da soja temos mais uma fase bem definida quanto à sua necessidade hídrica, são elas: i) estágio inicial – começa no plantio até a cultura atingir aproximadamente 10% de cobertura do solo; ii) estágio de desenvolvimento – ocorre dos 10% de cobertura até início da floração; iii) estágio médio – ocorre da floração até início da maturação (enchimento dos grãos); iv) estágio intermediário – ocorre após o final da floração até o enchimento completo das vagens; v) estágio final - maturação até a colheita.

Apesar de complexo, o ciclo de vida da soja pode ser resumidamente demonstrado na Tabela 2, sendo adotados valores médios para cada uma das fases do ciclo da cultura, chegando-se a um ciclo médio completo de 120 dias. Tais valores serão adotados para o cálculo do déficit hídrico (FARIAS et. al., 2001).

Tabela 2: Duração média de cada estágio fenológico do desenvolvimento com os coeficientes de produtividade (Ky).

Estádio fenológico	Duração (dias)	Valor de Ky
Semeadura e Emergência	Até 15	0,2
Desenvolvimento Vegetativo	50 a 60	0,3
Florescimento	10 a 20	0,95
Enchimento de grãos	20 a 30	0,63
Maturação	10 a 15	0,03

Fonte: MONTEIRO, 2009.

Doorenbos e Kassam (2000) expressaram a sensibilidade das culturas ao déficit hídrico através de um fator de sensibilidade (Ky) correlacionando a queda de rendimento com o déficit de evapotranspiração relativa. Este valor indica, que havendo deficiência de água no solo, a cultura responde negativamente, diminuindo o seu rendimento. A maioria das culturas, em termos de rendimento, reage diferentemente ao déficit hídrico em função da fase de desenvolvimento. Desta forma, o déficit hídrico ocorrido em uma ou mais fases está associado a uma redução percentual na produtividade máxima, sendo o rendimento relativo dado pela relação entre este rendimento máximo e o déficit de evapotranspiração em cada fase de desenvolvimento (SILVA, 2014).

Em termos de eficiência da produção da soja, vale destacar que é de igual importância a quantidade de água disponível, bem como a distribuição da água de forma adequada para atender às necessidades hídricas da planta em cada estágio fenológico. A fase mais crítica e sensível ao estresse hídrico está entre o florescimento e o enchimento das vargens. A necessidade de água estimada para as fases fenológicas e desenvolvimento da planta, estão relacionadas com o coeficiente da cultura (Kc), e para a soja está sendo exibida na Figura 4.

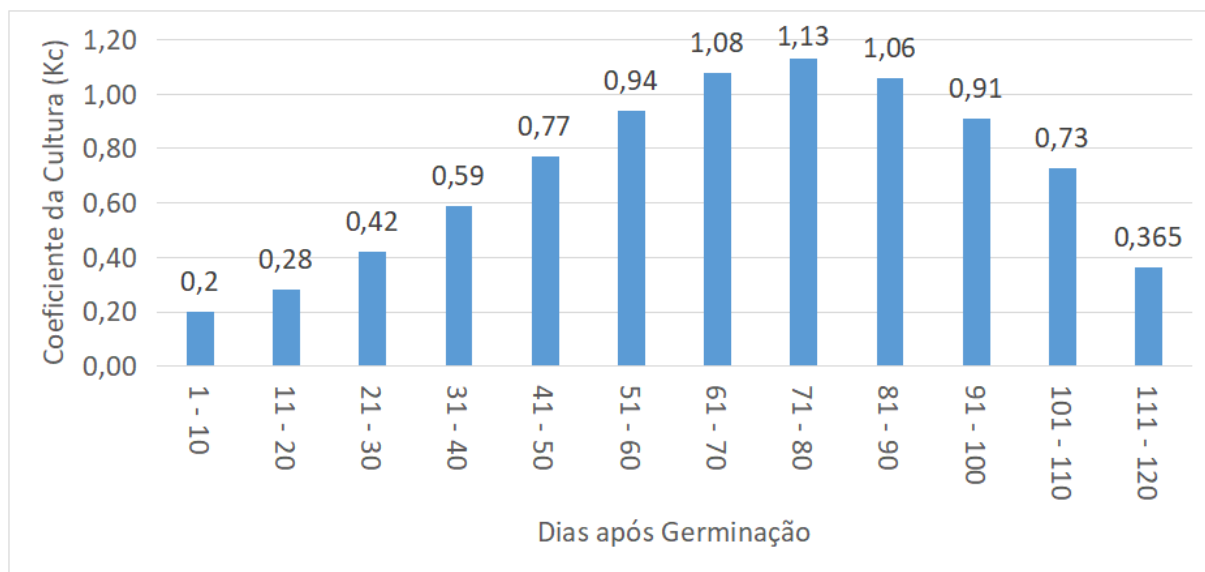
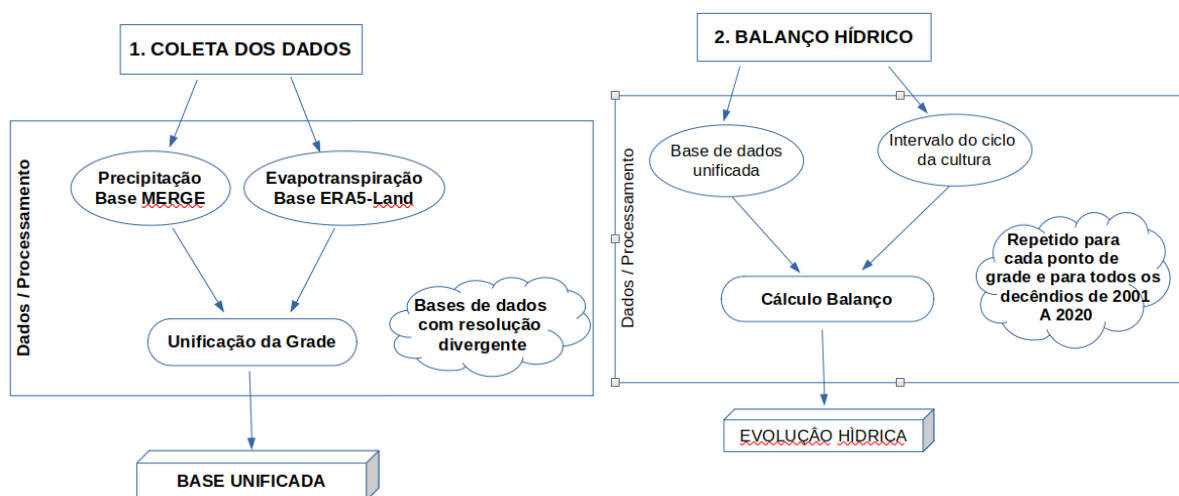


Figura 4: Variação do coeficiente da cultura (K_c) para cada decêndio do ciclo da germinação a produção da soja.

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979).

A representação esquemática dos principais passos adotados para o cálculo do modelo agrometeorológico de penalização por déficit hídrico foram:



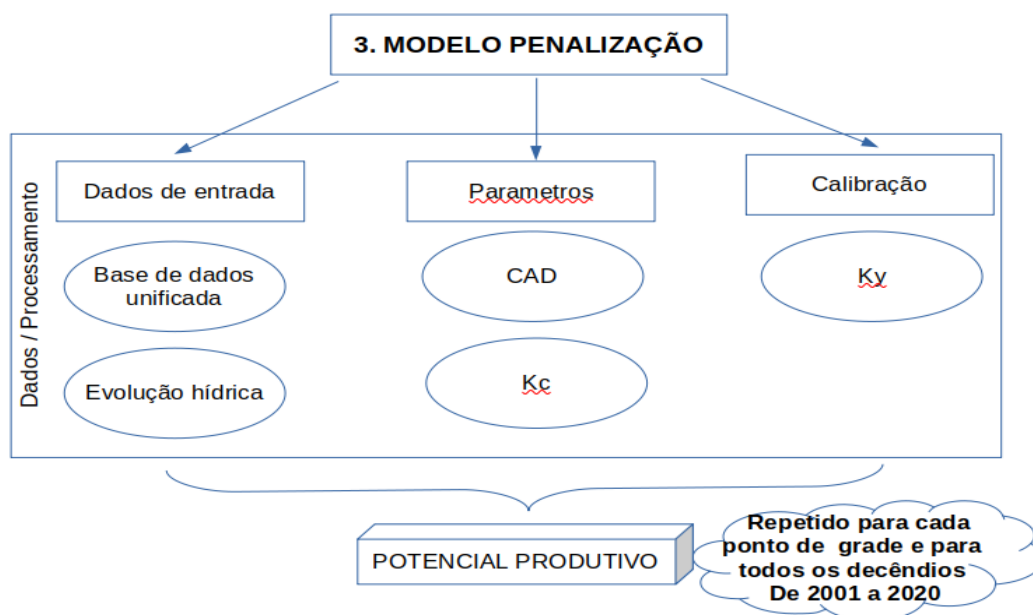


Figura 5: Representação do esquema adotado no método do modelo agrometeorológico .

Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise da base de dados

Nesta seção serão apresentados os resultados e discussões das principais características climáticas da região SEALBA. Inicialmente serão mostrados os resultados dos padrões e as médias climáticas referentes à área de estudo. Em seguida, será definida, dentre as diversas bases de dados meteorológicas, qual seria a mais indicada para a SEALBA.

O regime de precipitação pluviométrica pode ser observado na Figura 6 para cidades da região SEALBA (Porto de Pedras/AL, Maceió/AL, Palmeira dos Índios/AL, Propriá/SE, Aracaju/SE, Itabaianinha/SE, Alagoinha/BA). Nota-se que a quadra chuvosa para todas as cidades fica entre os meses de Abril a Julho, destacando o mês de Maio como o mais chuvoso do ano para a região, à exceção do norte do SEALBA, que possui o mês de Junho como o mais chuvoso do ano, compreendendo as estações de Porto de Pedras/AL e Maceió/AL. Existe um gradiente expressivo de precipitação entre a região litorânea (leste do SEALBA) e o continente (oeste do SEALBA), conforme comparativo dos valores das estações de Propriá/SE, Alagoinha/BA, Palmeira dos Índios/AL a Maceió/AL e Aracaju/SE (SOUZA e OYAMA, 2017).

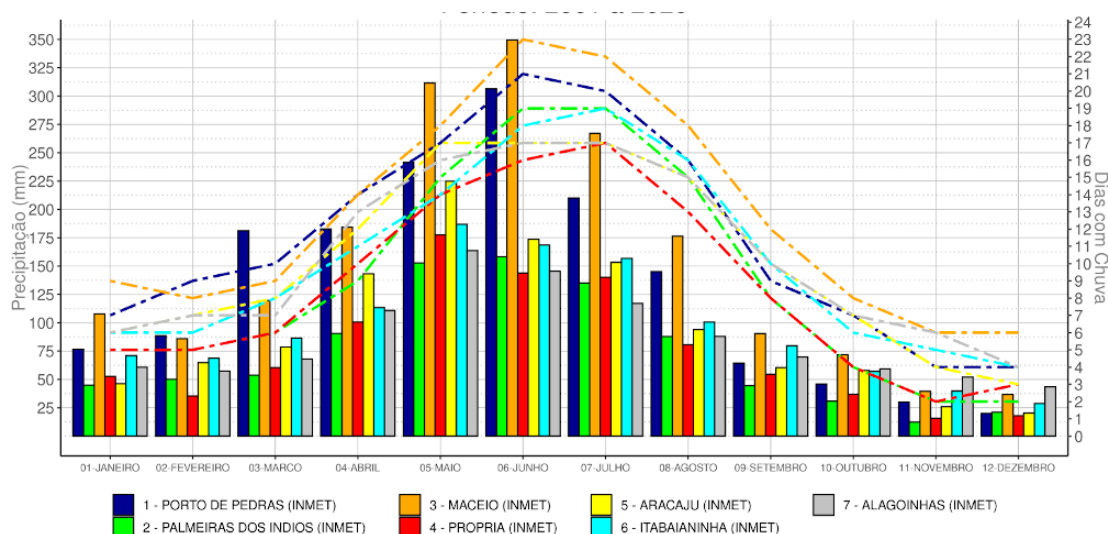


Figura 6: Média Climática das estações meteorológicas do SEALBA, base de dados INMET, entre os anos de 2001-2010. Precipitação (coluna) e Dias com Chuva maior que 1mm (linha).

Fonte: Autor.

Visando avaliar as bases de dados MERGE, CHIRPS, ERA5 e ERA5-Land para a região do SEALBA, observando as estações localizadas nas cidades contidas na Tabela 1, são exibidos na Tabela 3 os índices estatísticos para todas as bases de dados, sendo comprovada a significância estatística de 99% nas comparações realizadas.

Pode-se afirmar, após a análise da Tabela 3, que a base de dados MERGE é a mais indicada para estudos e análises da variável precipitação pluviométrica, com valor de r fortíssimo (acima de 0,9) e sendo responsável por 95% de acerto na estimativa da referida variável meteorológica. Desta forma, a base de dados MERGE servirá como parâmetro nas avaliações espaciais feitas com as demais bases.

Vale destacar que as estimativas realizadas para precipitação baseadas somente em imagens de satélite (MERGE e CHIRPS) foram mais eficientes em comparação às estimativas realizadas com base em dados de reanálises (ERA5 e ERA5-Land). Tal condição, contudo, não inviabiliza o uso de dados de reanálise que apresentaram valores de r acima de 0,63 para precipitação, existindo, ainda, a possibilidade da utilização de outras variáveis meteorológicas (temperatura e umidade relativa do ar, vento, radiação, etc). Com relação ao RMSE, a base de dados MERGE foi ligeiramente melhor. Entretanto, as bases CHIRPS e ERA5-Land possuem condições próximas que as tornam fonte alternativa de dados em relação à base MERGE. Já a

MAE, que mede a magnitude do erro médio, teve resultado tão significativo que reafirma como principal base de dados a MERGE.

Tabela 3: Análise estatística da precipitação pluviométrica mensal para as diferentes bases de dados meteorológicos, nas mesmas localidades das estações, durante o período entre 2001 e 2020. Espaço amostral médio de 300 registros.

LOCAL	VARIÁVEL	BASE DE DADOS			
		MERGE	CHIRPS	ERA5	ERA5-Land
Porto de Pedras/AL	<i>r</i>	0,96 *	0,72 *	0,71 *	0,85 *
	<i>RMSE</i>	34,60	92,80	107,93	85,00
	<i>MAE</i>	20,00	53,10	72,10	56,70
Palmeiras dos Índios/AL	<i>r</i>	0,95 *	0,81 *	0,72 *	0,82 *
	<i>RMSE</i>	24,00	46,40	49,90	45,60
	<i>MAE</i>	12,10	29,90	38,10	30,60
Maceió/AL	<i>r</i>	0,99 *	0,85 *	0,81 *	0,90 *
	<i>RMSE</i>	24,50	71,50	108,30	91,20
	<i>MAE</i>	13,80	43,90	67,70	59,90
Própria/SE	<i>r</i>	0,97 *	0,89 *	0,72 *	0,78 *
	<i>RMSE</i>	17,40	35,90	52,20	56,40
	<i>MAE</i>	9,30	22,70	39,50	38,20
Aracaju/SE	<i>r</i>	0,93 *	0,95 *	0,67 *	0,85 *
	<i>RMSE</i>	31,80	31,10	70,10	52,00
	<i>MAE</i>	20,27	22,22	47,77	34,82
Itabaianinha/SE	<i>r</i>	0,96 *	0,85 *	0,64 *	0,82 *
	<i>RMSE</i>	23,50	44,70	58,90	55,30
	<i>MAE</i>	15,10	30,10	43,70	37,90
Alagoinhas/BA	<i>r</i>	0,97 *	0,87 *	0,62 *	0,77 *
	<i>RMSE</i>	16,10	33,00	52,70	50,40
	<i>MAE</i>	9,80	24,40	41,50	36,80

* Significância estatística: $p \leq 0,01$.

Fonte: Autor

Resultados parecidos também foram encontrados por Santos et. al., (2019), quanto à precisão da base de dados do CHIRPS, onde análises quantitativas evidenciaram que o CHIRPS apresenta erros sistemáticos de subestimativa (viés negativo) e superestimava (viés

positivo) nas quatro estações do ano. Por outro lado, os valores de RMSE não ultrapassam 5 mm por estação ao ano. Já Rozante, et. al., (2020), ressalta a boa representatividade do MERGE para o litoral do NEB (R4 em seu artigo) em termos de valores de r e RMSE, e destaca ter margens para melhorar a representação das nuvens quentes por partes dos satélites.

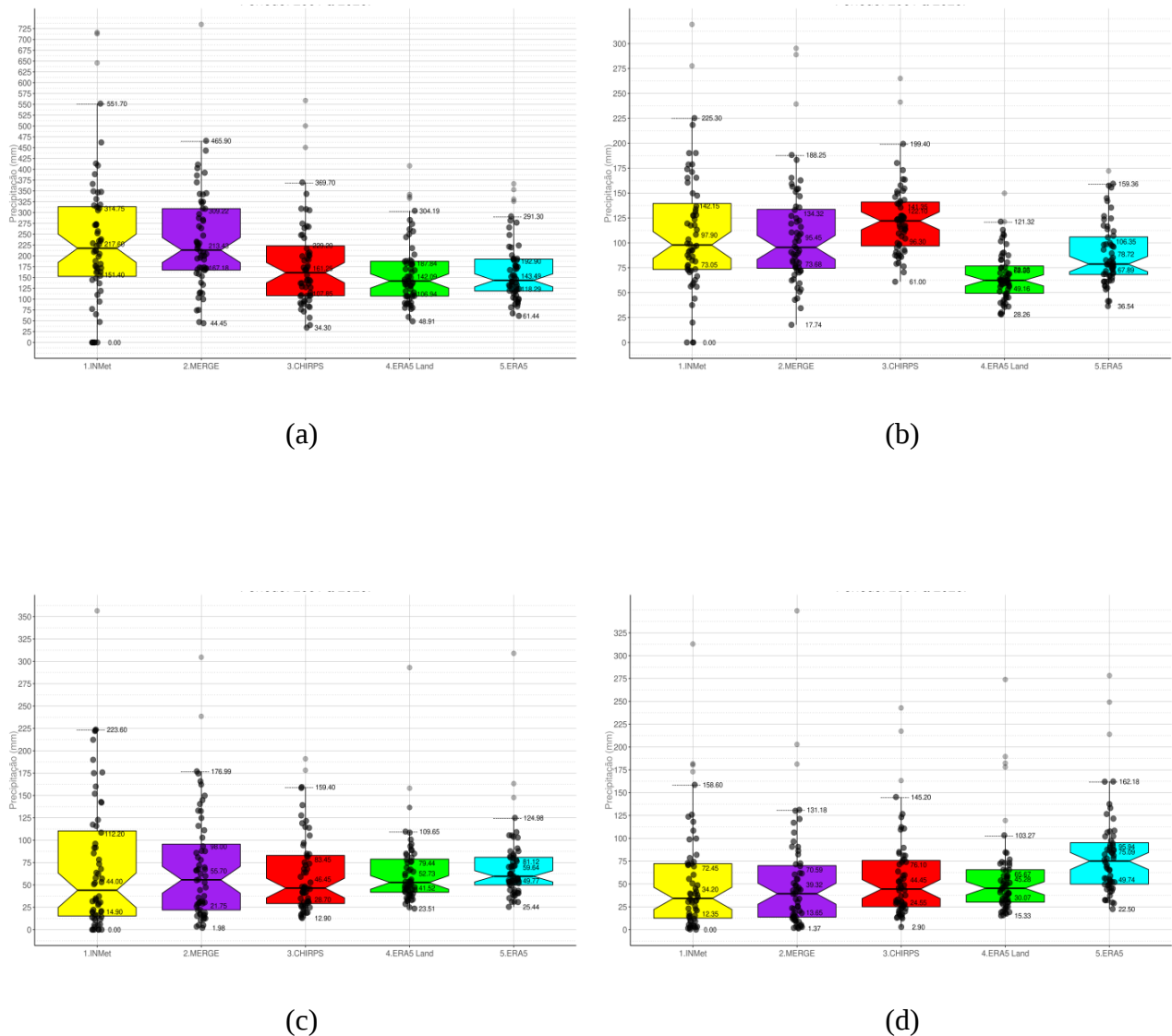


Figura 7: Comparativo da Média Climática das bases de dados com estação INMet do SEALBA, (a) e (c) para a cidade de Maceió/AL, respectivamente para os meses de Junho-Julho-Agosto e Dezembro-Janeiro-Fevereiro entre os anos de 2001 e 2020, (b) e (d) para a cidade de Alagoinhas/BA, respectivamente para os meses de Junho-Julho-Agosto e Dezembro-Janeiro-Fevereiro entre os anos de 2001 e 2010.

Fonte: Autor.

Na Figura 7 pode-se afirmar que a base de dados MERGE tem uma forte representatividade para determinar eventos extremos positivos e negativos, ao contrário das demais bases de dados que subestimam ou superestimam as precipitações acima da média nos

meses de maior intensidade de chuvas. O mesmo fato ocorre nos períodos de verão, onde os menores índices de precipitação são superestimados.

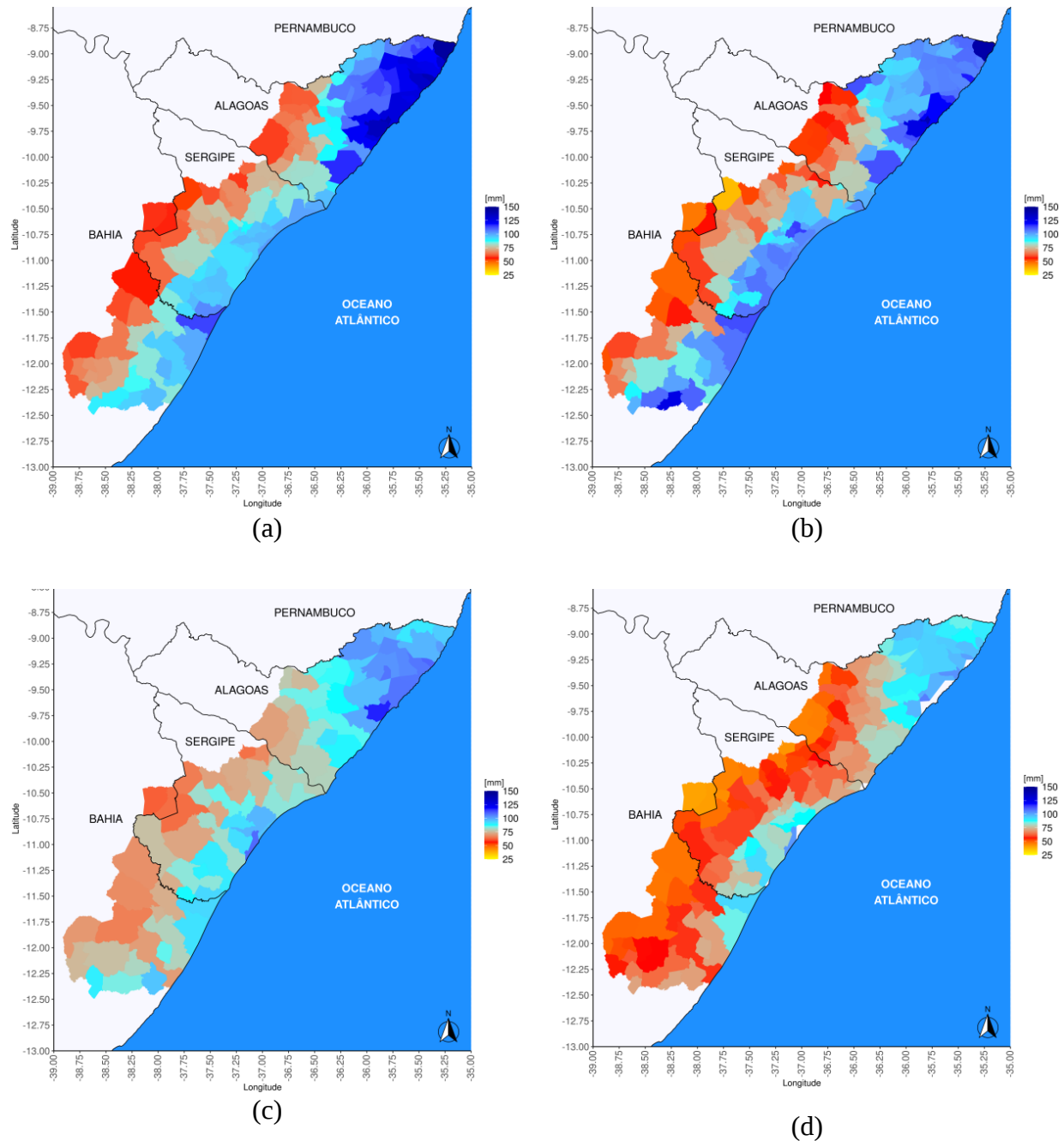


Figura 8: Distribuição espacial da precipitação pluviométrica média mensal para a região SEALBA, base de dados MERGE (a), CHIRPS (b), ERA5 (c) e ERA5-Land (d).

Fonte: Autor.

Já a Figura 8 comprova o maior regime pluviométrico na faixa litorânea da região SEALBA, com decréscimo à medida que se adentra na faixa continental. Demonstra, ainda, duas sub-regiões distintas: a primeira no norte da SEALBA, na região do litoral norte do

Estado de Alagoas, com alto índice de precipitação, e a outra sub-região no extremo sul da SEALBA, na região norte do Estado da Bahia com baixo índice de precipitação.

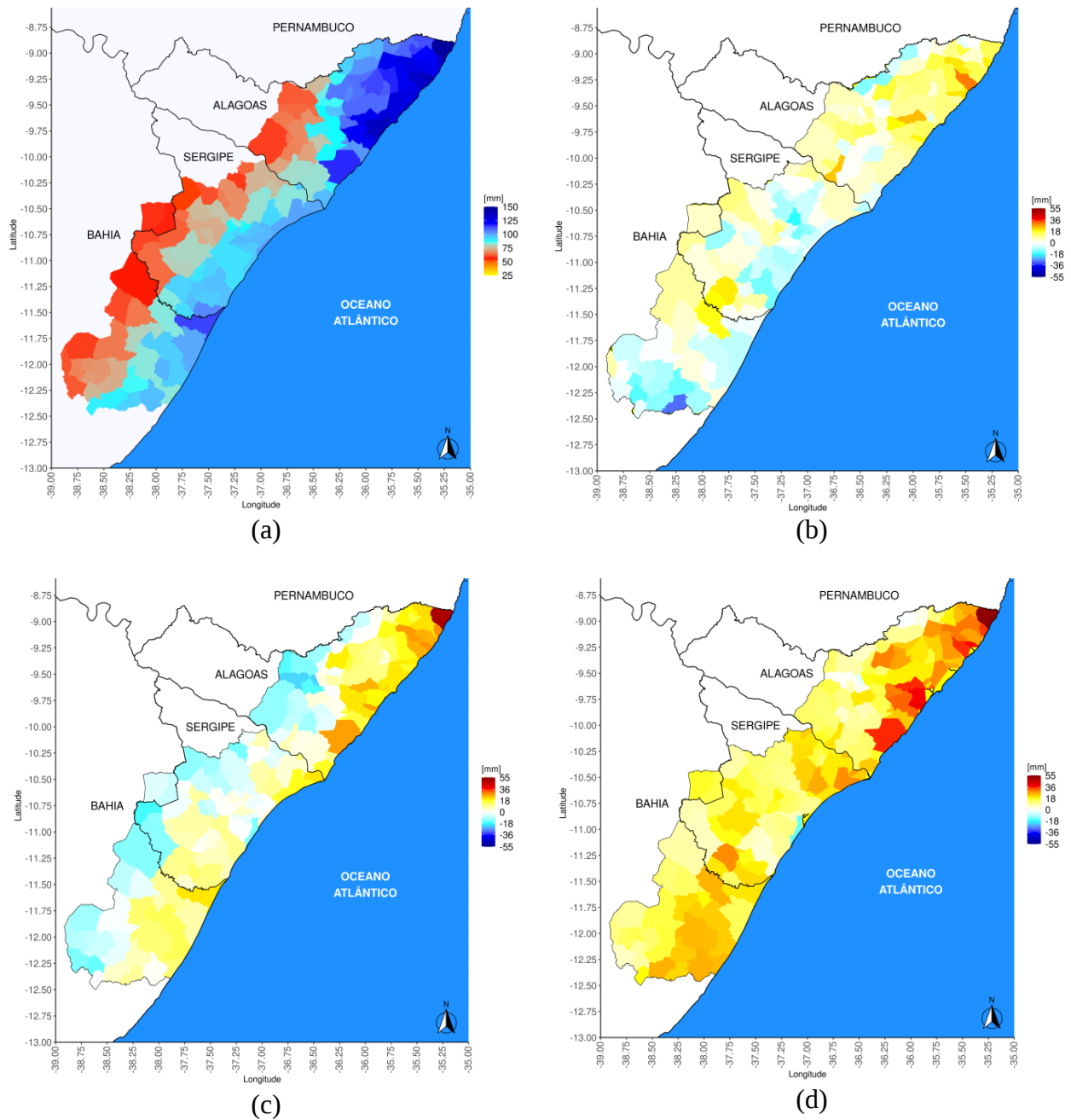


Figura 9: Diferença da distribuição espacial da precipitação pluviométrica média mensal para a região SEALBA, base de dados MERGE (a) e subtração com as bases CHIRPS (b), ERA5 (c) e ERA5-Land (d).

Fonte: Autor.

Destaca-se o clima mais rigoroso em termos de chuva no norte de Alagoas, com precipitação média mensal superior a 75 mm, sendo a média nos municípios litorâneos acima de 100 mm/mês, com chuvas distribuídas em mais de 10 dias/mês, como demonstrado na

Figura 8, favorecendo o não surgimento de veranicos nestas áreas para o período da quadra chuvosa, sendo ótimo para a atividade agrícola.

Na comparação espacial feita entre as bases de dados, tendo a MERGE como parâmetro (devido ao melhor desempenho estatístico observado nas localidades das EMC), notou-se melhores distribuições para os dados CHIRPS, ERA5 e ERA5-Land, nesta ordem. Destaca-se a subestimativa (CHIRPS, ERA5 e ERA5-Land) na porção Norte da SEALBA e superestimativa (CHIRPS e ERA5) na porção Sul da SEALBA. A base de dados ERA5-Land subestimou a estimativa da chuva para toda a região SEALBA. À execução da base MERGE, as demais têm dificuldades na previsão da precipitação em áreas de alto índice pluviométrico, subestimando a intensidade da chuva na localidade, o mesmo ocorrendo em relação às áreas em que há baixa precipitação, contudo em menor intensidade.

Em linhas gerais, os resultados apresentados estão de acordo com a literatura que trata do regime de chuvas no NEB, em especial para a faixa litorânea, onde se encontra a região SEALBA, podendo-se citar o trabalho de Santos et. al., (2019) apud Kousky, (1979); Cavalcante, et. al., (2009). Nesse estudo os autores compararam a base de dados CHIRPS com dados observacionais e afirmaram que para todas as estações do ano é possível representar o padrão climatológico de precipitação, com a ressalva de que os dados CHIRPS apresentaram erros sistemáticos em RMSE, não ultrapassando os 5 mm.

Ainda em concordância com o apresentado por Santos et. al., (2019), no inverno, a precipitação é concentrada no litoral leste do NEB (Zona da Mata), onde são observados acumulados de precipitação superiores a 100 mm, sendo os mecanismos produtores de chuva desta região a entrada da massa de ar tropical (intensificação AAS - Alta do Atlântico Sul) ou ainda, os distúrbios ondulatórios de leste que atingem o litoral nordestino com maior intensidade.

Já Silva, et. al., (2011), avaliando a pluviometria e dias chuvosos na região do Nordeste do Brasil, comprovaram que Alagoas e Sergipe são os estados nordestinos com maior número de dias com chuva no ano (em média 109 dias, intensidade anual de 1096 mm e 1066 mm, respectivamente), ficando a Bahia no 4º lugar com 75 dias e média anual de 978 mm. Comparando à base de dados MERGE para a região de estudo SEALBA, obteve-se uma avaliação bem semelhante à do estudo de Silva et. al., (2011), onde nas cidades de Maceió/AL e Propriá/SE se observou 96 e 84 dias de chuva, respectivamente, e na cidade de Alagoinhas/BA 79 dias de chuva para o período da quadra chuvosa mostrada na Figura 6.

Avaliando a média climática entre os dados do INMET (EMC) e dados MERGE, a Figura 10 mostra que a base MERGE consegue representar o padrão de intensidade de chuva observado pelo INMET, tendo um erro médio mensal por estação de aproximadamente 10 mm, e um erro acumulado mensal de aproximadamente 100 mm de chuva no mês de Junho, apesar de as intensidades serem condizentes com a distância das cidades em relação ao oceano.

As duas bases de dados analisadas na Figura 10 definem os meses entre Abril e Julho como a quadra chuvosa. Vale ressaltar que a precipitação acumulada anual média para a cidade de Maceió/AL é de 1867,4 mm e 1648,7 mm, respectivamente para as fontes de dados INMET e MERGE. O mesmo comparativo foi realizado para a cidade de Alagoinhas/BA, com precipitação de 1073,3 mm e 1009,9 mm, respectivamente, para as bases INMET e MERGE e, por fim, a cidade de Propriá/SE, com precipitação de 963,0 mm e 920,9 mm, respectivamente para as bases INMET e MERGE. Em média, a quadra chuvosa representou 56,6% do total anual de precipitação considerando as cidades indicadas na Tabela 1.

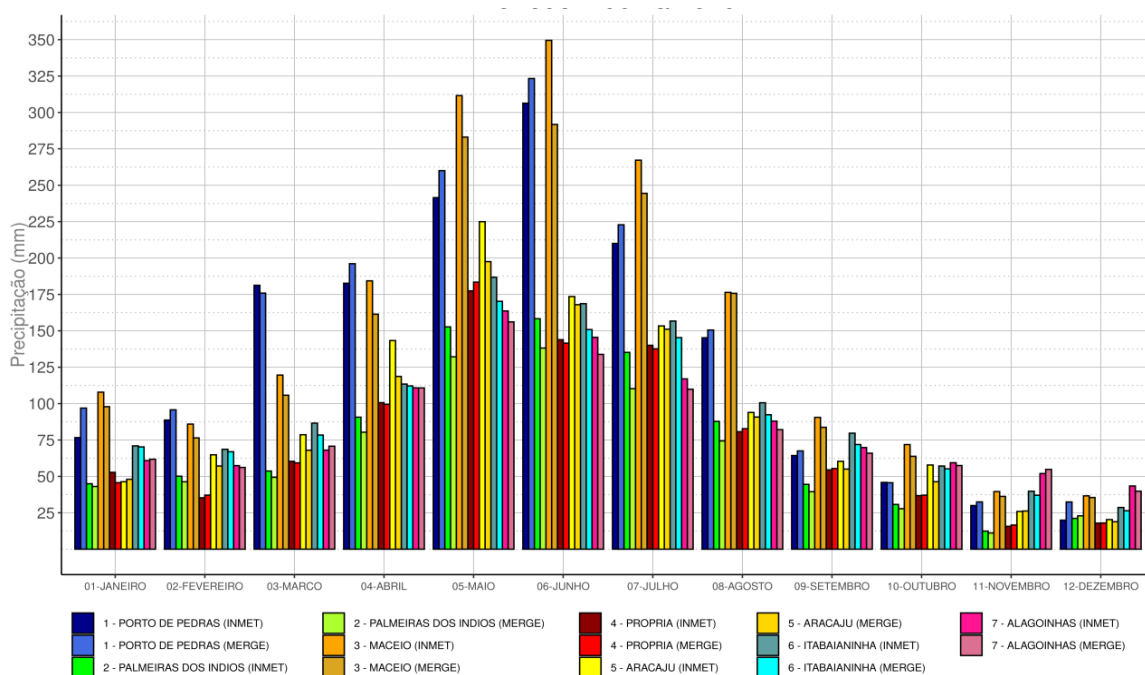


Figura 10: Média climática das bases de dados MERGE e INMET para as localidades das estações meteorológica do INMET para o período compreendido entre 2001 a 2020.

Fonte: Autor.

Na tentativa de fazer uma relação entre disponibilidade e necessidade hídrica de algumas culturas de interesse agrônomo, o estudo de Carvalho, et. al., 2013, mostra para a cultura do milho (*Zea mays L.*) a demanda hídrica em torno de 500 a 800 mm por ciclo de produção, para o Arroz (*Oryza sativa L.*) variando entre 450 a 700 mm durante todo ciclo,

para a soja (*Glycine max L.*) entre 450 a 850 mm por ciclo de produção, para o feijão (*Phaseolus vulgaris, L.*) cerca de 100 mm mensais, para o café (*Coffea arábica L.*) a demanda hídrica entre 800 a 1200 mm por ciclo de produção, para o algodoeiro (*Gossypium hirsutum*) entre 450 a 700 mm por ciclo e, finalmente, para a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) a demanda hídrica em torno de 1000 e 2000 mm por ciclo de produção.

Portanto, culturas perenes ou semiperenes apresentam necessidades hídricas compatíveis com a faixa litorânea da região SEALBA, onde o regime de chuvas é mais rigoroso, variando de 100 a 150 mm/mês. Já para a região agreste da SEALBA, onde ocorre uma redução de aproximadamente 50% da intensidade de chuva em relação ao litoral, é necessário avaliar as melhores cultivares.

4.2 Zoneamento da melhor época de semeadura

Para analisar o zoneamento e a melhor época de semeadura, utilizou-se a base de dados MERGE para a variável de precipitação, por ser a que melhor representa o regime de pluviométrico da SEALBA durante a série temporal de 2001 a 2020. Considerando que a base MERGE não contempla a ETP no período, utilizou-se a base de dados ERA5-Land exclusivamente para tal variável.

Estas variáveis foram utilizadas como dados de entrada para o cálculo do modelo agrometeorológico por déficit hídrico, sendo realizados cálculos para simular os decêndios para cada ano da série temporal em termos de resolução espacial, ou seja, a quantidade e o posicionamento dos pontos de grade tiveram como referência a base de dados MERGE de 0,1° (aproximadamente 10 km de distância), obtendo assim um valor médio por decêndio para cada ponto da grade.

Para as análises das estimativas da produtividade potencial da soja, seguiu-se o proposto por Paixão et. al., (2014), que descreveu a metodologia reversa de estimativa das produtividades. Desta forma, em vez de exibir uma escala de perdas de produção, adotou-se uma escala de potencial produtivo variando de 0 a 100%, onde 0% seria perda total da produção causada por condições não favoráveis ao cultivo da soja e 100% representaria condições altamente favoráveis ao cultivo sem nenhuma interferência hídrica negativa em seu período de cultivo.

De modo a balizar e servir de parâmetro para as análises da produtividade potencial relacionada com o déficit hídrico, Monteiro et. al., (2013), aplicaram o mesmo modelo

agrometeorológico para avaliar a perda de produtividade por deficiência hídrica em diferentes localidades brasileiras e mostraram que, quando o modelo indicava perda relativa de produtividade superior a 50%, em mais de 90% dos casos as perdas de campo foram comprovadas por laudos técnicos do IBGE. Portanto as Figuras 9 e 10 que seguem, terão como patamar de indicação das condições de desfavoráveis (<50%), intermediárias (50% a 70%), e favoráveis (>70%) de produtividade potencial e, conseqüentemente, melhor época para a semeadura da soja, como também proposto por Farias et. al., (2001).

Com o auxílio das Figuras 11 a 14, que mostram a produtividade potencial média percentual para cada decêndio dos meses do ano, pode-se notar e linhas gerais uma condição especial para a região Norte da SEALBA, mais especificamente no Norte do estado de Alagoas, sendo reflexo do regime de precipitação mais rigoroso nesta região em comparação às demais localidades ver Figura 8a. Obviamente, estas regiões são classificadas como aptas ao plantio e desenvolvimento da cultura da soja, vislumbrando o seu ciclo de produção. A mesma Figura permite detectar quais subáreas com menor penalização hídrica, favorecendo a maximização da produção de soja na região.

Citando como exemplo o mês de Janeiro mostrado na Figura 11, percebe-se que apenas a região do extremo norte da SEALBA possui condições favoráveis em termos de produtividade potencial para semeadura da soja, e com o avanço do decêndio, observa-se o aumento da faixa litorânea com condições favoráveis de potencial. Este comportamento se repete para o mês de Fevereiro, cujo último decêndio mostra quase a totalidade da SEALBA em condições apta ao plantio da soja (produtividade acima de 90%). Desta forma, existe uma tendência clara nos resultados apresentados nas Figuras 11 a 14, que apontam os meses compreendidos entre Fevereiro a Junho como favoráveis para o cultivo da soja, resultados estes também estão dentro dos parâmetros estabelecidos por Paixão et. al., (2014); Monteiro, (2013) e Farias et. al., (2001).

Não obstante isso, as análises espaciais de produtividade potencial permitem afirmar que em algumas áreas o cultivo pode ser antecipado para Dezembro/Janeiro ou postergado para Julho, a exemplo em Arapiraca/AL no terceiro decêndio de Janeiro. A depender da influência de fenômenos climáticos que favoreçam os períodos mais prolongados de chuva, como por exemplo Brisas Marítimas, DOLs (Distúrbios Ondulatórios de Leste), é possível, ainda, a obtenção de 2 safras de grãos, ante às condições altamente favoráveis no aspecto climático desta região de estudo.

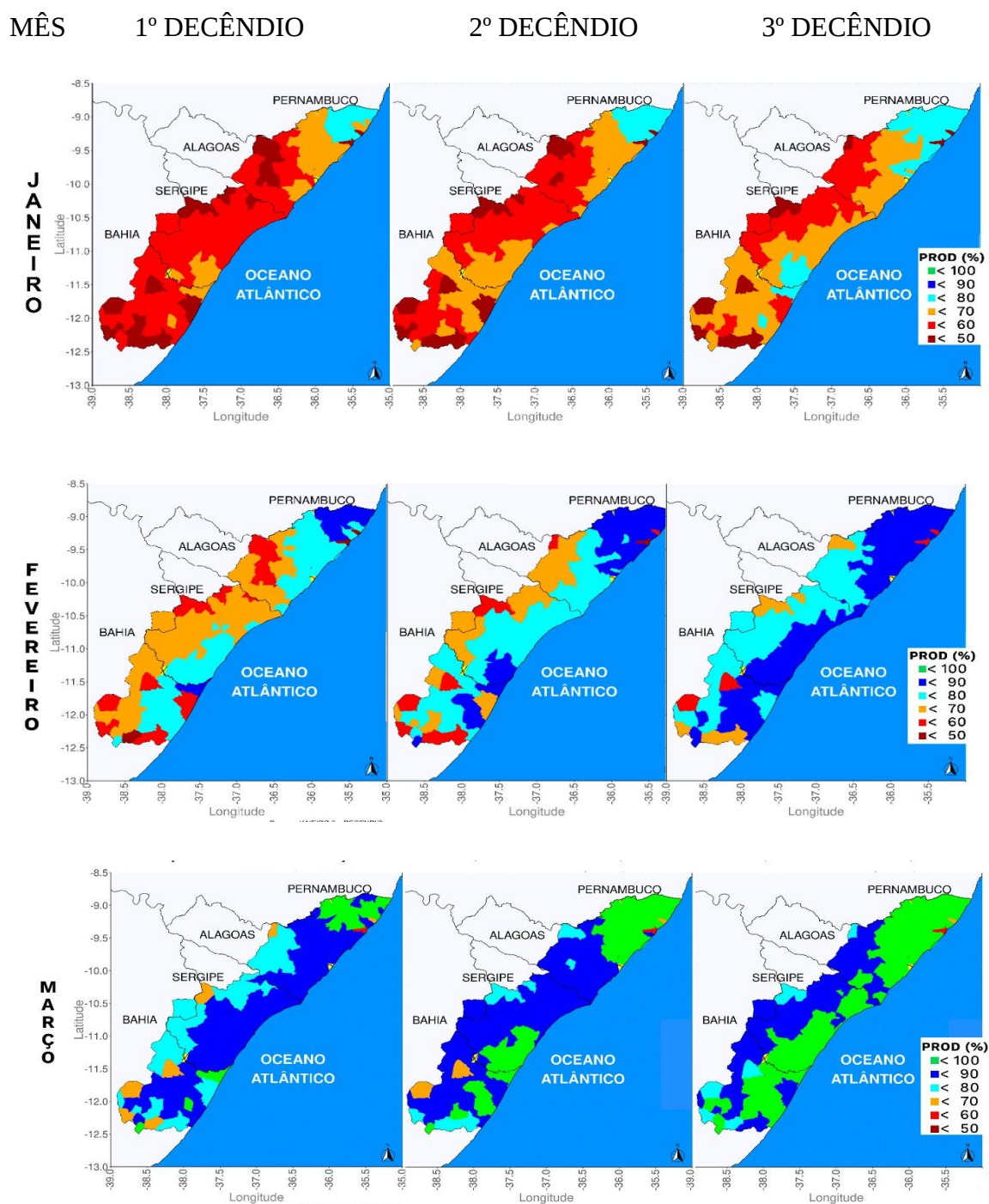


Figura 11 Produtividade relativa percentual média da soja para o primeiro, segundo e terceiro decêndios dos meses de Janeiro, Fevereiro e Março.

Fonte: Autor.

MÊS 1º DECÊNDIO 2º DECÊNDIO 3º DECÊNDIO

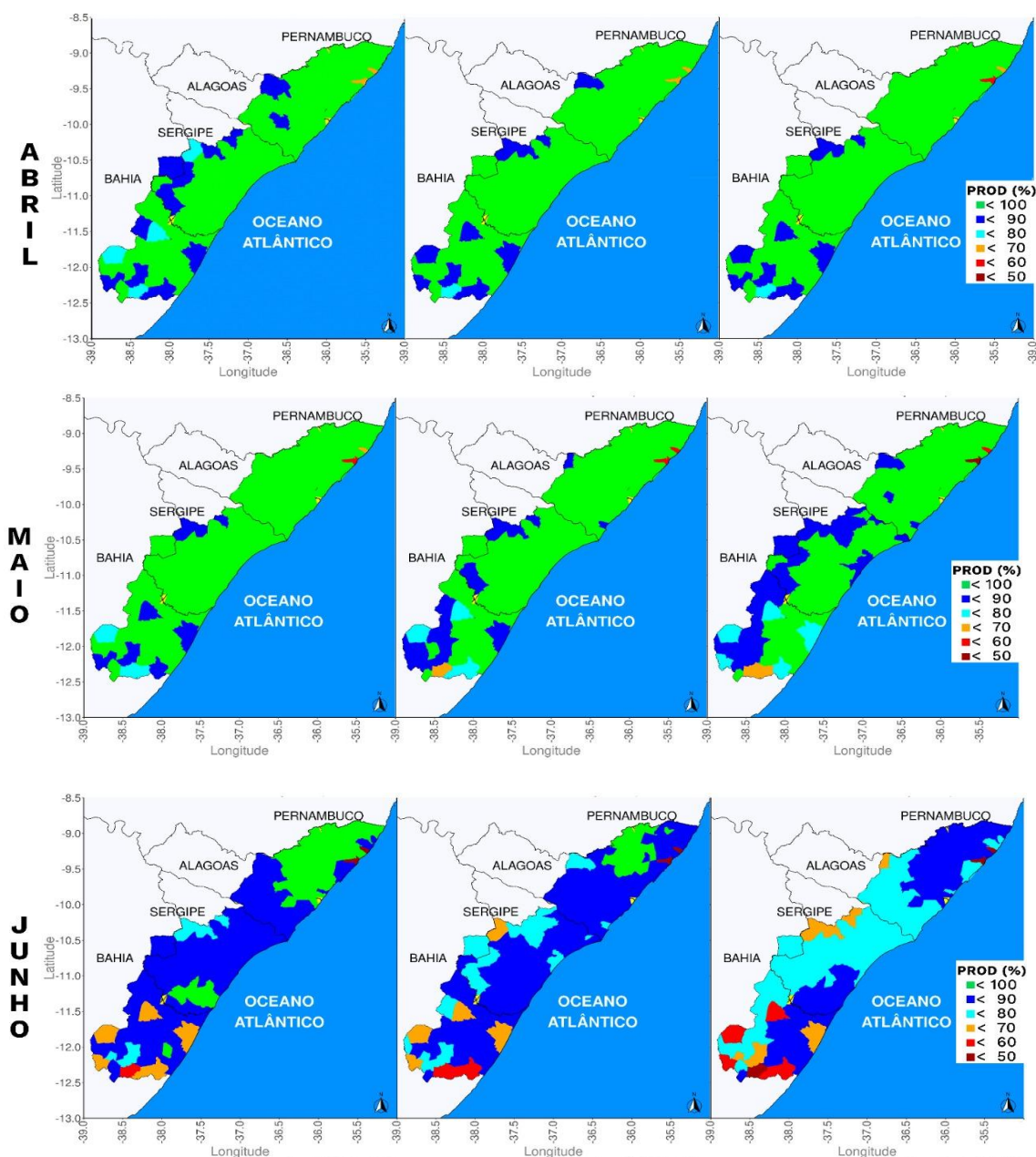


Figura 12 Produtividade relativa percentual média da soja para o primeiro, segundo e terceiro decêndios dos meses de Abril, Maio e Junho.

Fonte: Autor.

Ainda com base na Figura 12 nos meses de Abril e Maio, fica evidente que a região da SEALBA é extremamente promissora ao cultivo da soja, vez que quase toda a área da SEALBA encontra com produtividade potencial acima de 90%, simbolizando a grande disponibilidade e potencial hídrico da região em questão.

MÊS 1º DECÊNDIO 2º DECÊNDIO 3º DECÊNDIO

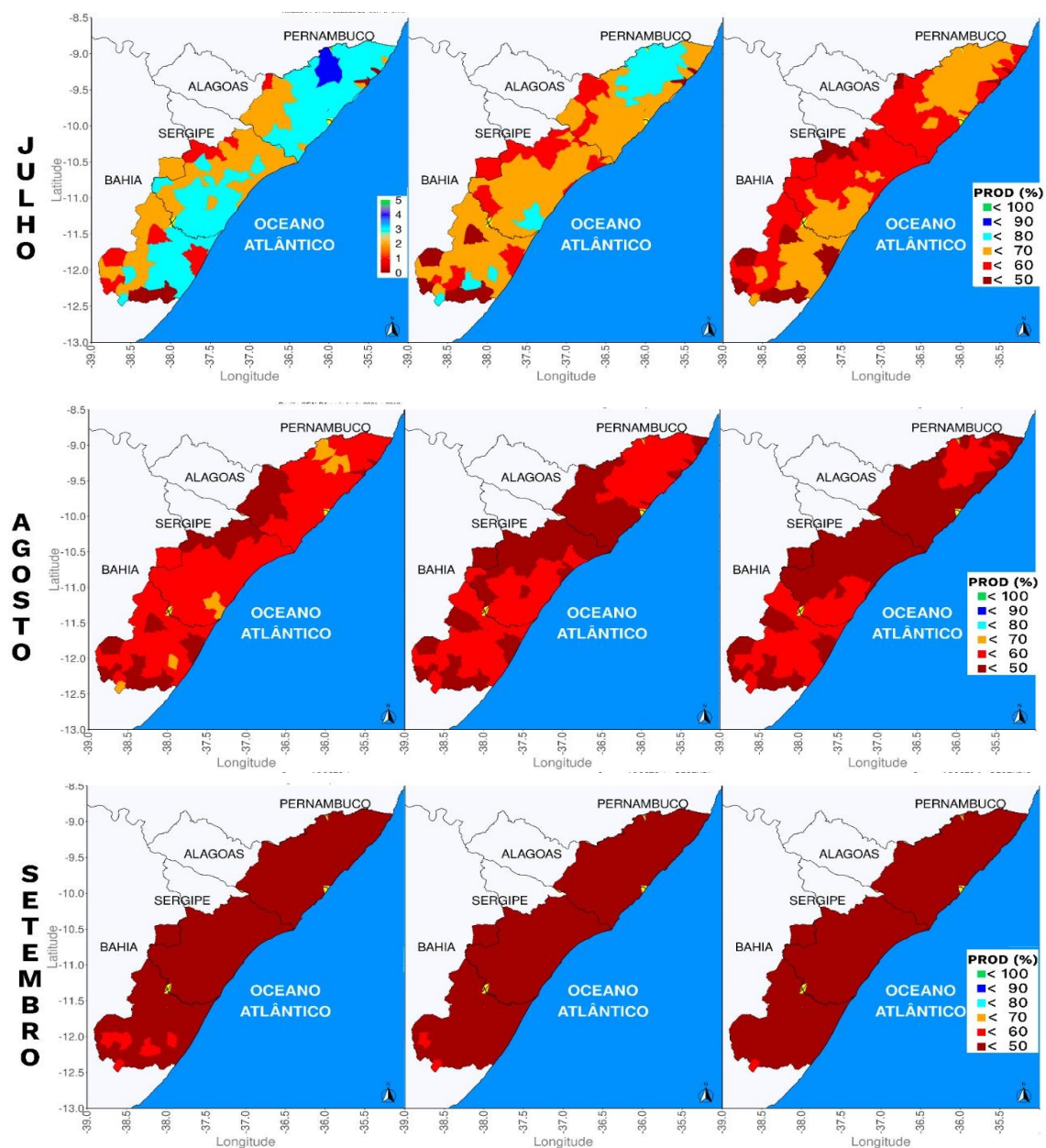


Figura 13 Produtividade relativa percentual média da soja para o primeiro, segundo e terceiro decêndios dos meses de Julho, Agosto e Setembro.

Fonte: Autor.

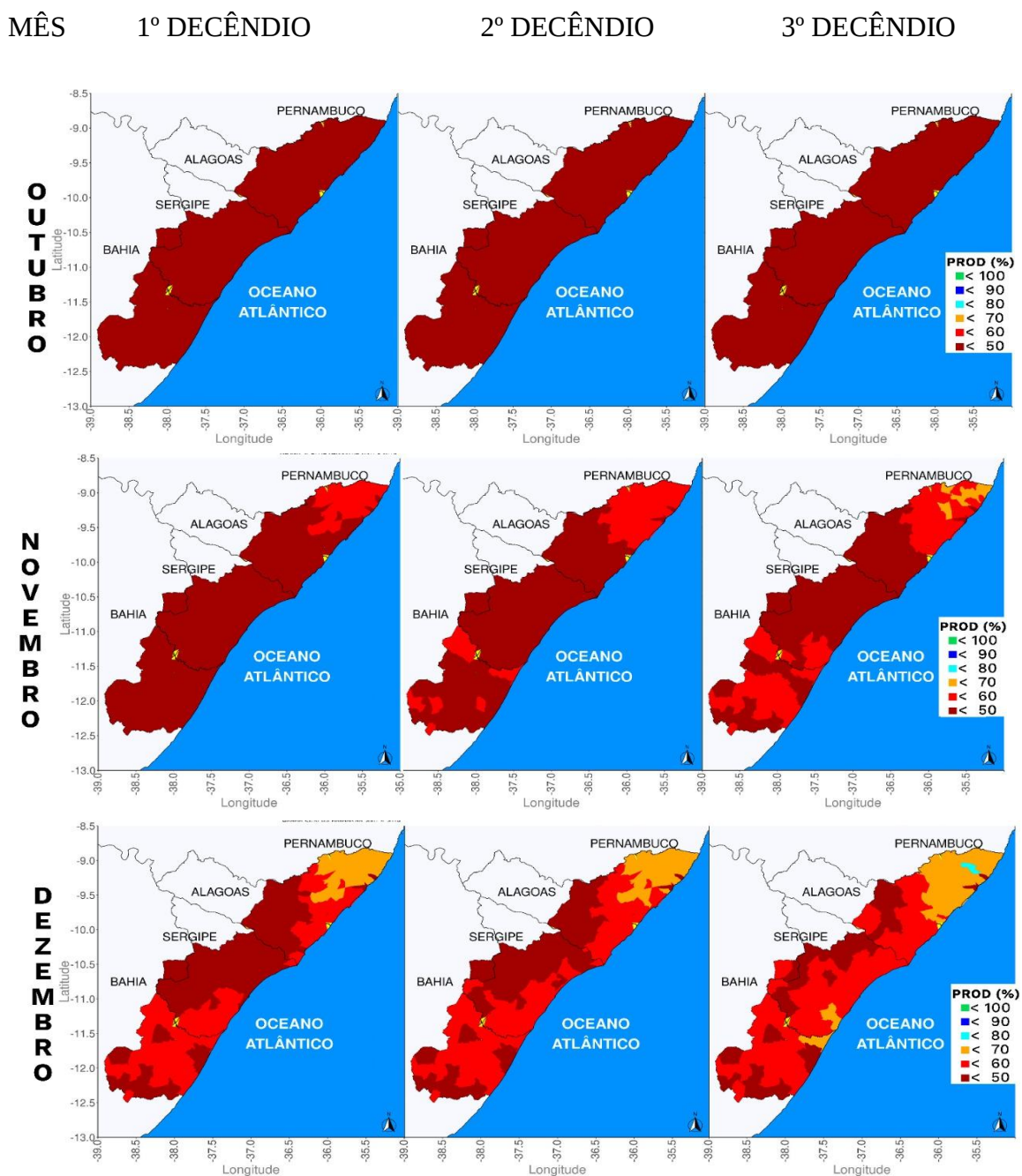


Figura 14 Produtividade relativa percentual média da soja para o primeiro, segundo e terceiro decêndios dos meses de Outubro, Novembro e Dezembro.

Fonte: Autor.

Com o auxílio das Figuras 13 e 14, pode-se observar fortes indícios de que os meses de Julho a Dezembro não reúnem características hídricas propícias para o cultivo e desenvolvimento da cultura, por apresentarem períodos mais prolongados de estiagem associado a maiores índices de ETP para a região, estando em grande parte com produtividade (PROD) abaixo de 60%. O mapeamento mostra ainda as melhores janelas de oportunidades

para a semeadura da soja nas diferentes subáreas, dada a variabilidade de precipitação entre os municípios da SEALBA.

Percebe-se que as subáreas em condições favoráveis à semeadura da soja têm um movimento que inicia ao extremo norte da região, ampliando no sentido litoral mais ao sul, atingindo posteriormente toda a região litorânea do SEALBA, e por fim chegando a região agreste. O mesmo ocorre em sentido inverso para as subáreas em condições desfavoráveis ou intermediárias. A região mais continental, como já esperado, possui uma maior vulnerabilidade às perdas, com uma janela mais curta variando do segundo decêndio de Fevereiro a Junho, com potencial produtivo igual ou superior a 70%. Existe ainda uma subárea localizada na região central da SEALBA, situada ao norte de Sergipe, com características bastante semelhantes ao agreste, com a mesma janela para o cultivo da soja.

As regiões Norte e litorânea do SEALBA possuem potencial produtivo e também a maior janela para o plantio da soja, considerando o primeiro decêndio de Fevereiro e o primeiro decêndio de Julho, proporcionando assim as maiores produtividades média relativa, conforme Figuras 11 a 13. Além disso, essa subárea tem ao seu favor uma topografia mais plana que possibilita o uso da mecanização, favorecendo ainda mais o cultivo da soja, que é uma cultura com um alto índice de mecanização, tanto no seu plantio como na colheita.

Tabela 4: Necessidade hídrica diária da soja por fase fenológica.

Fase Fenológica	Acumulado (mm)	Média Diária (mm)
Semeadura e Emergência	28	1,9
Desenvolvimento Vegetativo	255	4,6
Florescimento	130	8,7
Enchimento de grãos	161	6,4
Maturação	26	2,6
Totais	600	5,0

Fonte: Autor.

De modo a ampliar as discussões e relacionar a produtividade com os estágios fenológicos da soja, a Tabela 4 traz os resultados obtidos por Farias et. al., (2007), que relacionam o rendimento satisfatório de produtividade da cultura da soja com uma necessidade hídrica entre 450 a 800 mm, e com o sua necessidade máxima de pico em 7,5

mm/dia na fase de floração. Efetuando uma relação desse acumulado de água com a evapotranspiração da cultura que depende do Kc de fase fenológica, obtém-se a necessidade hídrica para cada uma das fase de desenvolvimento da planta. Assim sendo, pode-se afirmar que a necessidade hídrica favorável para produção satisfatória gira em torno de 600 mm para todo o ciclo da cultura, com destaque para o fato de que no primeiro mês seria necessário 65 mm (cerca de 2,2 mm/dia), ou seja, aproximadamente 11% de todo o ciclo da cultura.

Vale destacar, que as sequencias de resultados apresentados nas Figuras 11 a 14, estão diretamente relacionadas como o regime hídrico da região Leste do NEB, bem como sua precipitação e evapotranspiração potencial. Como foi ressaltado no tópico 2.2 do presente estudo, a quadra chuvosa reconhecida pela literatura estaria entre os meses de Abril - Julho, período confirmado nos resultados apresentados nas Figuras 4 e 8. Contudo, de acordo com a recomendação de produtividade potencial, a indicação é para que o plantio da soja tenha início em Fevereiro, antes do inicio da quadra chuvosa, o que mostra a existência de uma relação combinada entre a diminuição da ETP e ETC e o aumento da Precipitação, como pode ser notado na Figura 15.

Desta maneira, é possível afirmar que, pela relação existente entre as variáveis, há indícios de uma antecipação do inicio de disponibilidade hídrica positiva no sistema para o início do mês de Março, onde tem a intersecção entre a Precipitação e o ETC que esta relacionada com a necessidade hídrica planta, demonstrando uma relação mais significativa que a ETP (que se baseia no potencial de evapotranspiração máxima da região, cultura padrão). Outra justificativa para a recomendação para o plantio em meados de Fevereiro consiste na baixa necessidade hídrica que a cultura da soja necessita em sua fase inicial (65 mm médio), conforme mostrado na Tabela 4, ou seja, qualquer precipitação que seja igual ou superior a 2,2 mm/dia seria suficiente para o desenvolvimento inicial da planta.

De acordo com a Figura 15, existe uma deficiência hídrica entre os meses de Janeiro e Fevereiro, e também entre os meses de Agosto a Dezembro, onde os valores de ETC são maiores do que Prec, simbolizando perda de água no sistema solo-planta para a atmosfera. Para estes meses seriam necessárias à utilização de irrigação caso fosse do interesse do produtor iniciar a semeadura no período. Já os meses entre Março até Julho seriam os indicados para a semeadura da soja, pois apresentam disponibilidade hídrica satisfatória para a planta, ou seja, a Prec com valores superiores a ETC.

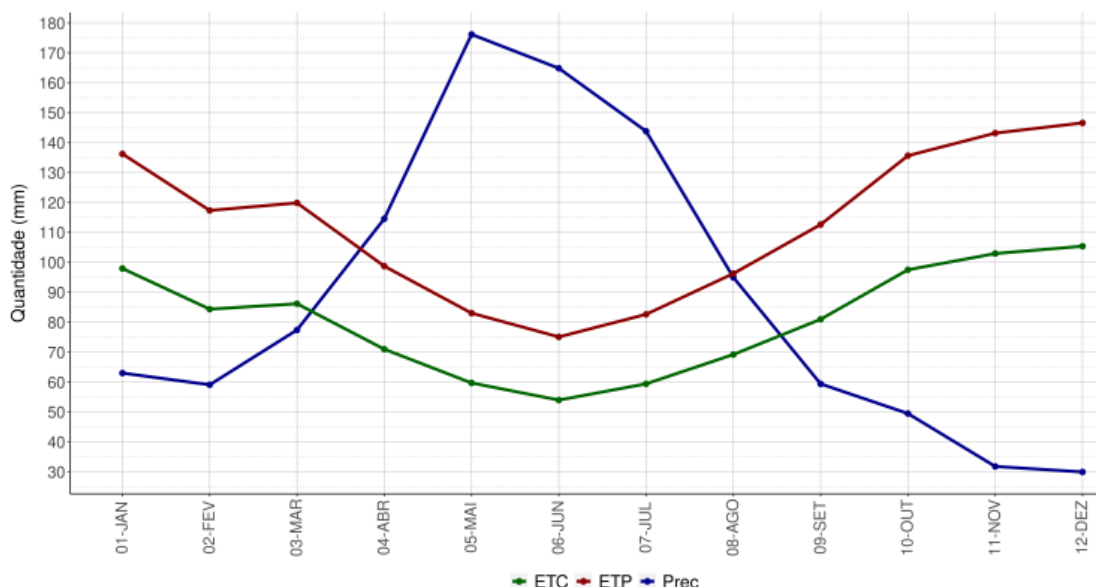


Figura 15: Avaliação da disponibilidade hídrica baseado em ETC - Evapotranspiração da Cultura, ETP - Evapotranspiração Potencial, e Prec -Precipitação. Situação média para toda a região da SEALBA.

Fonte: Autor.

De modo a avaliar a distribuição das chuvas durante as fases fenológicas da planta em comparação ao acumulado do ciclo do desenvolvimento da cultura (120 dias), considerando a afirmação de Sentelhas et. al., (2016), sobre o mínimo de necessidade hídrica de 450 mm para a produção satisfatória, e ainda com o auxílio da Tabela 4, que determina a necessidade hídrica ideal de 600 mm para otimizar a produção de soja, nota-se na Figura 16 que os meses de Março a Junho são os ideais para a produção de soja, com potencial produtivo de alto nível mesmo com um acumulado de precipitação abaixo do determinado na Tabela 4 e próximo ao mínimo necessário afirmado por Sentelhas et. al., (2016). A Figura demonstra, uma importância e maior influência da distribuição das chuvas em função do desenvolvimento da cultura, sendo um fato de maior relevância que o simples acumulado de precipitação para o ciclo da cultura.

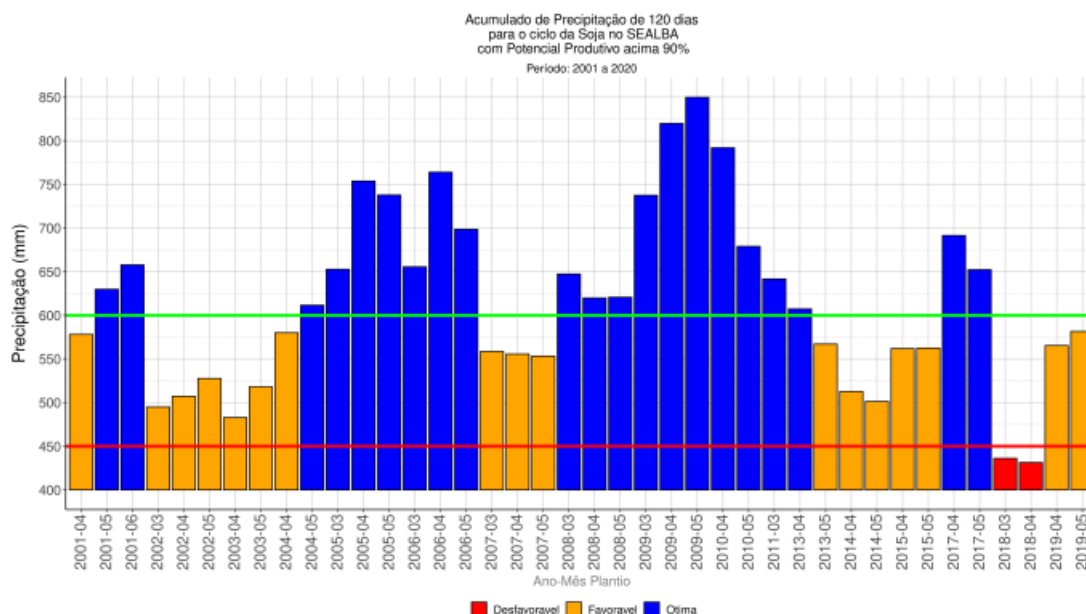
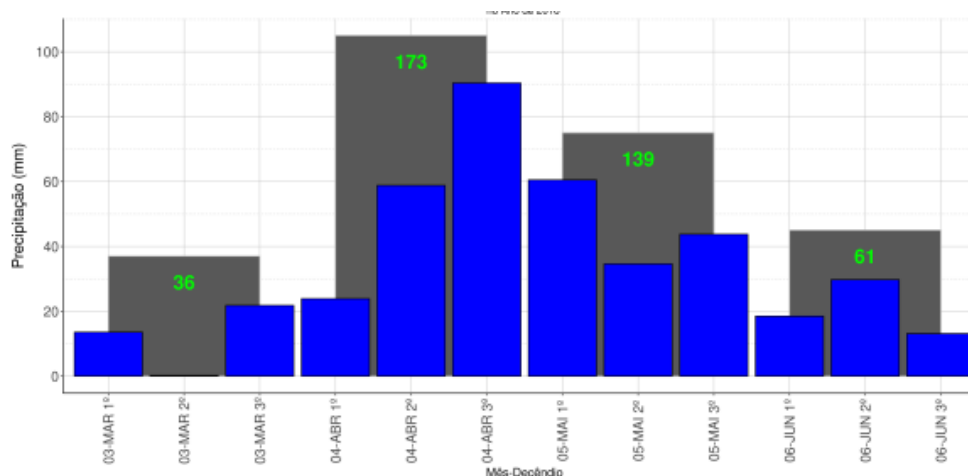


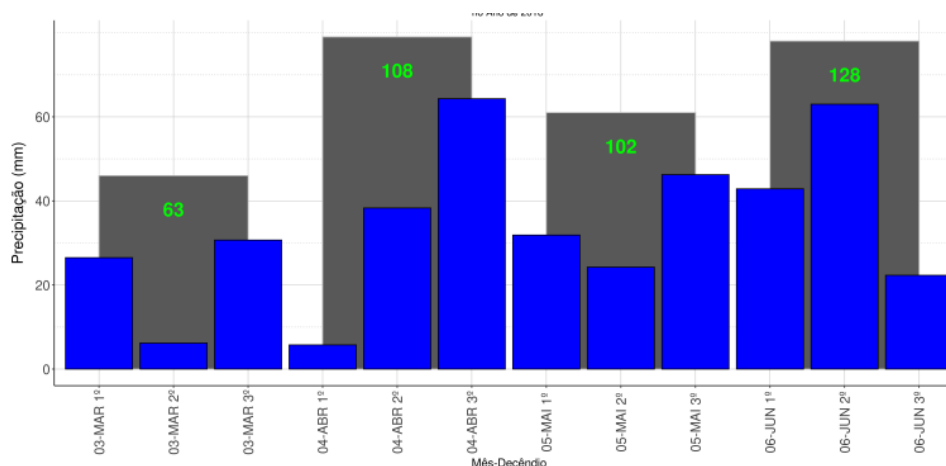
Figura 16: Acumulado de precipitação quadrimestral (120 dias), referente ao ciclo de produção da soja, com potencial produção acima de 90%.

Fonte: Autor.

Na avaliação de cenários altamente produtivos, como por exemplo com 90% do seu potencial produtivo, ficou evidente a contradição entre a alta produção por conta da distribuição da chuva de acordo com as fases fenológicas e os acumulados por ciclo da cultura. As Figuras 12 e 13a e b confirmam a importância da distribuição das chuvas para o bom desenvolvimento da cultura visando uma produção sem interferência da falta de água disponível para a planta em épocas de alta demanda para o seu desenvolvimento pleno, demonstram uma pequena influência na diminuição do seu potencial de produção. Destaca-se o período de Março e Abril de 2018, onde o acumulado de chuva ficou abaixo dos indicados para a produção satisfatória da cultura da soja e o resultado do modelo mostra que esses períodos de plantio tem potencial de produção acima de 90%. Tal resultado se deve à distribuição das chuvas e não ao acumulado das mesmas, como se pode destacar na Figura 17a e b, que exibem um ponto da grade do SEALBA onde o acumulado mensal da precipitação foi considerado baixo e mesmo assim teve um potencial produtivo elevado.



(a)



(b)

Figura 17: Precipitação acumulada por mês e decêndio para o ciclo de produção da soja com potencial produtivo acima de 90%, comparativo entre os pontos geográficos (a) lon=-36,25° e lat=-9,35° (próximo à Viçosa/AL) e (b) lon=-38,35° e lat=-11,65° (próximo à Itamira/BA).

Fonte: Autor.

Obedecendo aos critérios estabelecidos na Figura 16, de produção potencial acima de 90%, com precipitação acumulada abaixo de 450 mm e observando o ciclo da cultura de 120 dias, foram selecionadas duas regiões da SEALBA com tais características para o quadrimestre de Março-Junho de 2018, que refletem a informação de que a distribuição da precipitação ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura e não o acumulado de precipitação do ciclo é mais importante para a produção. De modo a facilitar o entendimento a Figura 17 em conjunto com a Tabela 4 mostram a relação entre a precipitação decendial com as fases fenológicas, deixando evidente que, independente do acumulado mensal, o importante é a distribuição da chuva nas fases fenológicas da soja, ver Figura 17a. Contudo, mesmo a precipitação inferior a 65 mm no primeiro mês de desenvolvimento da cultura (Figura 17a)

não foi suficiente para comprometer o potencial produtivo elevado quando comparado à Figura 17b, com 63 mm.

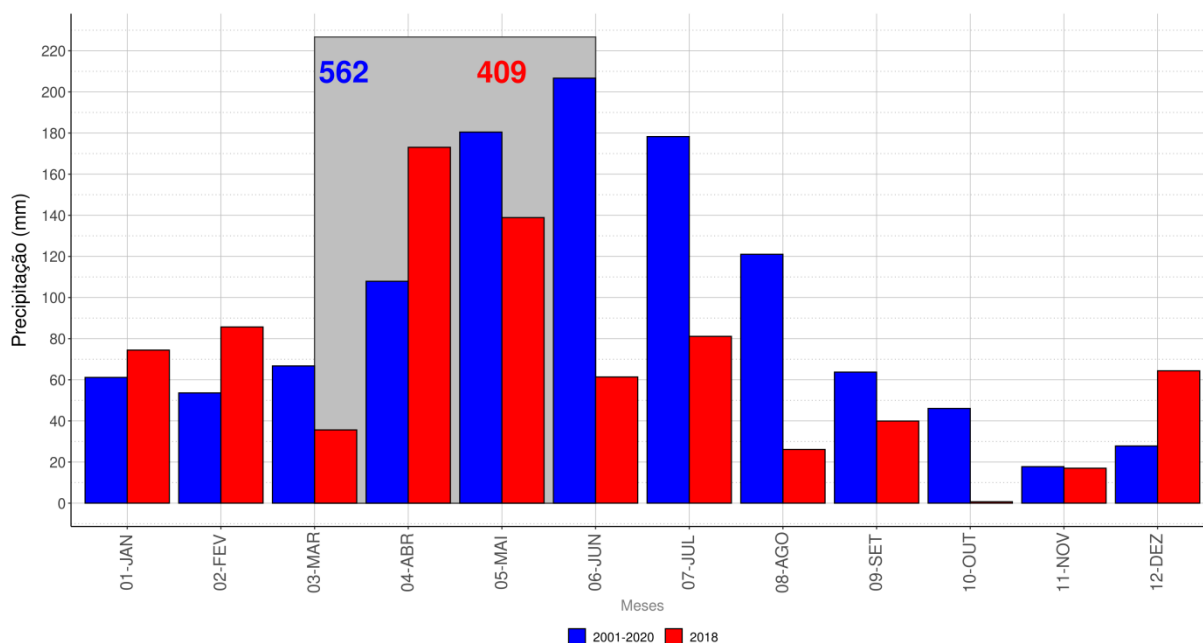


Figura 18: Média do acumulado mensal de precipitação para o período de 2001 a 2020 e do ano 2018, referente ao ponto geográfico lon=-36,25° e lat=-9,35° (próximo à Viçosa/AL).

Fonte: Autor.

Analisando o comportamento da precipitação para o ponto de grade próximo a Viçosa/AL visto na Figura 17b, temos um regime de chuva para o quadrimestre referente o ciclo de desenvolvimento da soja, com acumulado de 409 mm, abaixo da média do período de 2001 a 2020, onde o acumulado foi de 562 mm, como mostrado na Figura 18. Mesmo que o acumulado esteja abaixo da média da região, a distribuição regular de chuva favorece em muito o desenvolvimento ideal da cultura, visto que no segundo e terceiro mês do ciclo - desde o fim da fase de desenvolvimento vegetativo até o enchimento dos grãos - houve uma disponibilidade de água ideal para seu desenvolvimento pleno, atendendo às necessidades das fases fenológicas mais críticas, como sugerido por Doss et. al., (1974); Sionit e Kramer, (1977); Farias et. al., (2001) e sendo traduzido em números por Farias, et. al., (2007), que estima a necessidade de 7 a 8 mm/dia, cujo estágio indicado tem duração de 30 a 50 dias, o que iria demandar entre 210 a 350 mm. Por outro lado, a Figura 18 mostra que neste ano de 2018 a subárea teve um regime de chuva bem abaixo da média em destaque para o segundo semestre, o que se deve à influência de fenômenos meteorológicos como ENOS, que modificam a distribuição e intensidade das chuvas.

A Figura 19 mostra o resultado da produtividade potencial prevista em escala de 0 a 100% para cada decêndio, deixando evidente que os meses compreendidos entre Fevereiro e Junho, com produtividade acima de 70% são favoráveis para a semeadura da soja. De modo inverso, pode-se destacar que os meses de Julho a Dezembro e também o mês de Janeiro, não são aptos para o plantio da soja, na medida em que há um alto potencial de perdas para o cultivo da soja nesta região de estudo, tendo ainda os meses de Julho e Dezembro como meses de transição com possibilidade de perdas potenciais, visto que seus valores mesmo superando o limiar de 50% ainda estão bem próximos a este valor.

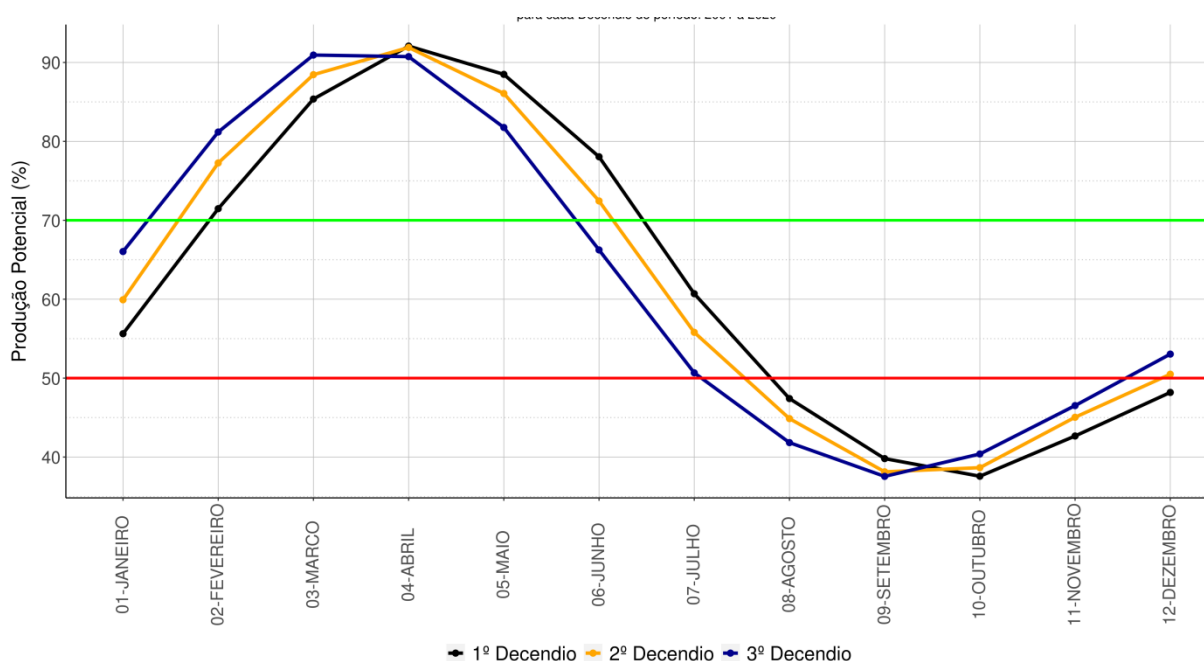


Figura 19: Produtividade potencial média mensal da SEALBA para a cultura da soja.

Fonte: Autor.

De fato, o comportamento espaço temporal dos três decêndios para os valores médios do intervalo de 2001 a 2020 são praticamente os mesmos e obviamente com uma pequena defasagem. Assim, pode-se afirmar que o período favorável para a soja na SEALBA compreende os meses Fevereiro a Junho, com valores de produção potencial iguais ou superiores a 70%, reduzindo assim o impacto da estiagem na produção de grãos. Pode-se afirmar, ainda, que as condições edafoclimáticas da região SEALBA são propícias para o cultivo da soja.

Para facilitar o processo de determinação de um calendário ótimo de semeadura em cada subárea, foram considerados como favoráveis os decêndios do ano que conseguem superar em 70% a produtividade relativa, intermediários os decêndios do ano com condições

entre 50% a 70% e desfavoráveis os que apresentaram condições abaixo de 50%. Para tanto, em cada um dos 171 municípios integrantes da região SEALBA, os resultados foram compilados a partir da média dos dados das cidades que a compõem. Dentro da SEALBA, destacam-se 7 municípios mencionados na Tabela 1, que possuem estações meteorológicas e serviram de referência para representar a região SEALBA, a relação completa encontra-se no anexo 1.

Tabela 5: Calendário de Semeadura para cultura da soja para os 7 municípios do SEALBA para cada decêndio.

UF	MUNICÍPIO	DEC	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
AL	MACEIÓ	1												
		2												
		3												
AL	PALMEIRA DOS ÍNDIOS	1												
		2												
		3												
AL	PORTO DE PEDRAS	1												
		2												
		3												
SE	ITABAIANINHA	1												
		2												
		3												
SE	ARACAJÚ	1												
		2												
		3												
SE	PROPRIÁ	1												
		2												
		3												
BA	ALAGOINHAS	1												
		2												
		3												

Fonte: Autor.

4 CONCLUSÕES

A SEALBA surge com alto potencial para se tornar a mais nova fronteira agrícola brasileira de produção de grãos, uma vez que pesquisas de campo já mostraram, por exemplo, que a produtividade da soja na região é considerada de alta a muito alta.

Com apenas sete estações meteorológicas de longa duração em todo o seu território, este trabalho mostrou que a precipitação pode ser obtida para estudos climáticos e agrometeorológicos a partir de quatro fontes principais: MERGE, CHIRPS, ERA5 e ERA5-Land. Dentre estas, a MERGE, que é uma melhoria dos dados de precipitação estimados pelo satélite GPM-IMERG-EARLY a partir da combinação com observações de superfície, apresentou as maiores correlações e os menores erros, seguido por CHIRPS, ERA5-Land e ERA5.

Os resultados mostraram que nenhuma das fontes de dados deve ser totalmente excluída e na ausência de informações de uma delas, as demais podem e devem ser consultadas, respeitando a ordem de precisão das bases de dados MERGE, CHIRPS, ERA5-Land e ERA5.

Apesar das avaliações das bases de dados tenham sido realizadas em uma área muito específica a leste do NEB, os resultados comprovam que é muito provável que os dados ERA5-Land tenham representado uma melhoria significativa na estimativa da precipitação superficial do ERA5, da qual derivou. Além disso, as reanálises do ECMWF têm algumas vantagens sobre o MERGE e o CHIRPS, uma vez que essas fontes de dados produzem apenas dados de precipitação em superfície. As reanálises fornecem, ainda, dados sobre muitas outras variáveis, tanto na superfície quanto em diferentes níveis atmosféricos, que podem ser facilmente combinados com dados de chuva de melhor qualidade do MERGE e CHIRPS, por exemplo, como entrada para dados agrometeorológicos modelos para estimativa de produtividade de culturas.

O modelo agrometeorológico aplicado mostrou que a região de estudo tem condições favoráveis para a produção de grãos, com forte potencial produtivo, e os resultados recomendam uma janela de semeadura para o período do terceiro decêndio de Fevereiro até o terceiro decêndio de Junho. Existe uma variabilidade natural para subáreas da região SEALBA, de modo a afirmar que o extremo norte possui uma janela de cultivo maior, a partir do último decêndio de Dezembro ao primeiro decêndio de Julho, com um potencial produtivo acima de 70%.

Pode-se concluir ainda, que em média, os meses de Julho a Dezembro não são favoráveis ao cultivo da soja, por apresentarem altos índices de temperatura e baixíssimos índices de pluviosidade. Por ser uma cultura muito sensível a períodos de estiagem, o cultivo nesses meses possui altos riscos de perdas em face do déficit hídricos.

Espera-se que tais resultados possam guiar nas recomendações de janelas de plantio para a implantação desta cultura na nova e promissora fronteira agrícola no nordeste brasileiro, além de proporcionar e servir de base para novos estudos que busquem implantar e/ou recomendar novas oportunidades de produtos agrícolas para a região dominada pela monocultura da cana-de-açúcar, que se encontra em decadência.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o impacto das mudanças climáticas apontadas pelo IPCC no regime de precipitação, temperatura no SEALBA.
- Avaliar os cenários de mudanças climáticas na recomendação do cultivo de grãos (soja) no SEALBA.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-ACHI, A. The Student' s t-Test: A Brief Description. *Res. Rev. J. Hosp. Clin. Pharm.* 2019, 5, 1–3.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; Raes, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO irrigation and Drainage Paper 56. Fao Rome 1998, 300, D05109.
- ALVALA, R.C.S.; CUNHA, A.P.M.A.; BRITO, S.S.B.; SELUCHI, M.E.; MARENGO, J.A.; MORAES, O.L.L.; CARVALHO, M.A. Drought monitoring in the Brazilian Semiarid region. *An. Acad. Bras. Ciênc.* 2017, 91, 1–15.
- ARAÚJO, M.L.S.; SANO, E.E.; BOLFE, E.L.; SANTOS, J.R.N.; SANTOS, J.S.; SILVA, F.B. Spatiotemporal dynamics of soybean crop in the Matopiba region, Brazil (1990–2015). *Land Use Policy* 2019, 80, 57–67.
- ASSIS, J.M.O.; SOUZA, W.M.; SOBRAL, M.C.M. Climate analysis of the precipitation in the lower-middle stretch of the São Francisco river basin based on the rain anomaly index. *Rev. Bras. Ciênc. Ambient.* 2015, 2, 188–202.
- AZEVEDO, D. M. P.; COSTA, N. L.; FERREIRA, L. P. COMPETIÇÃO DE PLANTAS DANINHAS COM A CULTURA DE ARROZ DE SEQUEIRO EM OURO PRETO D'OESTE, RO. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 24(4):445-449, abr. 1989.
- BAKER, R.D., LYNN, B.H., BOONE, A., Tao, W.K., SIMPSON, J., The influence of soil moisture, coastline curvature, and land-breeze circulations on sea-breeze initiated precipitation. *J Hydrometeor* 2(2):193-211, 2001.
- BECK, H.E.; VERGOPOLAN, N.; PAN, M.; LEVIZZANI, V.; van DIJK, A.I.J.M.; WEEDON, G.P.; BROCCA, L.; PAPPENBERGER, F.; HUFFMAN, G.L.; WOOD, E.F. Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017, 21, 6201–6217.
- BERGAMASCHI, H. VIEIRA, H. J. LIBARDI, P. L., OMETTO, J. C., ANGELOCCI, L. R. DEFICIÊNCIA HÍDRICA EM FEJÓEIRO: EVAPOTRANSPIRAÇÃO MÁXIMA E RELAÇÕES COM A EVAPOTRANSPIRAÇÃO CALCULADA PELO MÉTODO DE PENMAN E COM A EVAPORAÇÃO DO TANQUE “CLASSE A”. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 24(4):387-392, abr. 1989.
- BORGHI, E.; AVANZI, J.C.; BORTOLON, L.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BORTOLON, E.S.O. Adoption and use of precision agriculture in Brazil: Perception of growers and service dealership. *J. Agric. Sci.* 2016, 8, 89.

CÂMARA, G.M.S. Ecofisiologia da soja e rendimento. In: CÂMARA, G.M.S. *Soja: tecnologias da produção*. Piracicaba: ESALQ, 1998. p.256-77.

CANTARELLI, A. L. D. CRESCIMENTO, PRODUTIVIDADE E BALANÇO HÍDRICO DE GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS, NOS TABULEIROS COSTEIROS DE ALAGOAS. Dissertação (Agronomia) – Universidade Federal de Alagoas, produção vegetal. 2019.

CARVALHO, M.A.V.; OYAMA, M.D. Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical Atlântica: Aspectos observacionais. *Rev. Bras. Meteorol.* 2013, 28, 305–316.

CARVALHO, L.M.V. Assessing precipitation trends in the Americas with historical data: A review. *WIREs Climate Change*, 11, e627, 2020.

CAVALCANTE, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA DIAS, M.A.F.; JUSTI, M.G.A. *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

COSTA, M. S. Vórtice Ciclônico Em Altos Níveis Associado À Corrente De Jato No Nordeste Brasileiro Nos Anos De 1998-2007. 2010. 113 F. Dissertação (Mestrado Em Meteorologia) – Universidade Federal De Alagoas, Maceió - Al. 2010.

COSTA, R.L.; GOMES, H.B.; PINTO, D.D.C.; JÚNIOR, R.L.D.R.; SILVA, F.D.D.S.; GOMES, H.B.; SILVA, M.C.L.D.; HERDIES, D.L. Gap Filling and Quality Control Applied to Meteorological Variables Measured in the Northeast Region of Brazil. *Atmosphere*, 12, 1278, 2021.

COUTINHO, M. D. L; GAN, M. A.; RAO, V. B. Método objetivo de identificação dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis na região Tropical Sul: validação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, p. 311-323, 2010.

DEE, D.P.; UPPALA, S.M.; SIMMONS, A.J.; BERRISFORD, P.; Poli, P.; KOBAYASHI, S.; ANDREA, U.; BALMASEDA, M.A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; et al. The Era-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Int. J. Climatol.* 2011, 137, 553–597.

DEMIRTAS, M.; NANCE, L.; BARNARDET, L.; Lin, Y.; CHUANG, H.-Y.; LOUGHE, A.; MAHONEY, J.; GALL, R.; KOCH, S. *The Developmental Testbed Center Verification System; WRF/MM5 Users' Workshop; NCAR: Boulder, CO, USA*, 2005.

DOORENBOS, J; KASSAM, A. H. Yield response to water. Roma, *Irrigation and Drainage Paper 33*, FAO, 179p, 1979.

DOORENBOS, J; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Tradução de GHEYI, H.R., SOUSA, A.A., DAMASCENO, J.F. 2ed. Campina Grande - UFPB, 221p (*Estudo FAO: Irrigação e Drenagem 33*), 2000.

DOSS, B. D.; PEARSON, R. W.; ROGERS, H. T. Effect of Soil Water Stress at Various Growth Stages on Soybean Yield. *Agronomy Journal*, v. 66, march-april 1974, 297-299p.

ESTOQUE, M. A. The Sea Breeze as a Function of the Prevailing Synoptic Situation. University of Hawaii. Journal of the Atmospheric Sciences. v-19, 1962, 244-250p.

FARIAS, J.R.B., NEUMAIER, N., NEPOMUCENO, A.L. Impactos da seca na produção de soja. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 10., 1992, Chapecó. Ata e Resumos. Chapecó: EPAGRI, p.169, 1993.

FARIAS, J.R.B., Assad, E.D., Almeida, I.R., et al., Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil, Revista Brasileira de Agrometeorologia, Passo Fundo, v.9, n.3, (Nº Especial: Zoneamento Agrícola), p.415-421, 2001.

FARIAS, J. R. b.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. Circular técnica 48, EMBRAPA Soja, setembro/2007.

FAVERO, D. Análise fisiológica e espectral de cultivares de soja submetidas à deficiência hídrica na fase reprodutiva. 2019. Tese (Mestrado em agronegócio). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Fitotecnia – Sistema de produção vegetal. Porto Alegre / RS, 2014.

FERREIRA, D.B.; RAO, V.B. Recent climate variability and its impacts on soybean yields in Southern Brazil. Theoretical and Applied Climatology, v.105, p.83-97, 2011.

FIGUEROA, S.N.; BONATTI, J.P.; KUBOTA, P.Y.; GRELL, G.A.; MORRISON, H.; BARROS, S.R.M.; FERNANDEZ, J.P.R.; RAMIREZ, E.; SIQUEIRA, L.; LUIZA, G.; et al. The Brazilian Global Atmospheric Model (BAM): Performance for Tropical Precipitation Forecasting and Sensitivity to Convective Scheme and Horizontal Resolution. Weather Forecast. 2016, 31, 1547–1572.

FU, G.; SHEN, Z.; ZHANG, X.; SHI, P.; ZHANG, Y.; WU, J. Estimating air temperature of an alpine meadow on the Northern Tibetan Plateau using MODIS land surface temperature. Acta Ecol. Sin. 2011, 31, 8–13.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; et al. The climate hazards infrared precipitation with stations: A new environmental record for monitoring extremes. Sci. Data 2015.

GARCIA, A.; VASCONCELO FILHO, J.C.; LONIEN, G.; ALBUQUERQUE, H.C. Avaliação de cultivares de soja em duas épocas de semeadura no Estado de alagoas. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL, 26., 2004, Londrina. Resumos... Londrina:Embrapa Soja:Fundação Meridional, p.253-254, 2004.

GAVA, R., FRIZZONE, J.A., SNYDER, R.L., eta al., ESTRATÉGIAS DE MANEJO DE DÉFICIT HÍDRICO NA IRRIGAÇÃO DA CULTURA DA SOJA, *Brazilian Journal of Biosystems Engineering* v. 10(3): 305-315, 2016

GOMES, H.B.; AMBRIZZI, T.; HERDIES, D.L.; HODGES, K.; Da SILVA, B.F.P. Easterly Wave Disturbances over Northeast Brazil: An Observational Analysis. *Adv. Meteorol.* 2015, 176238.

GOMES, H.B.; AMBRIZZI, T.; DA SILVA, B.F.P.; HODGES, K.; DIAS, P.L.S.; HERDIES, D.; SILVA, M.C.L.; GOMES, H.B. Climatology of easterly wave disturbances over the tropical South Atlantic. *Clim. Dyn.* 2019, 53, 1393–1411.

HERBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORANYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D.; et al. The ERA5 Global Reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020, 146, 1999–2049.

HIRAKURI, M.H.; BALBINOT JÚNIOR, A.A.; PROCÓPIO, S.O.; CASTRO, C. *Perspectiva Geral para a Introdução da Soja Nos Sistemas de Produção Agrícola da Região do SEALBA; Nota Técnica; Embrapa Soja: Londrina, PR, Brazil, 2016; 39p.*

HUFFMAN, G.J.; BOLVIN, D.T. Transition of Research Product from Monthly to Climatological Calibration/Adjustment. 2015; 11p. Available online: https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/3B42_3B43_TMPA_restart.pdf (acessado em 30 Novembro de 2021).

IBGE—Agência IBGE News. IBGE Predicts Record Grain Harvest in 2020. Available online: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/26537-ibge-preve-safra-recorde-de-graos-in-2020> (acesseado em 20 de Abril de 2020).

JIAO, D.; XU, N.; YANG, F.; XU, K. Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China. *Sci. Rep.* 2021, 11, 17956.

JOYCE, R. J.; JANOWIAK, J. E.; ARKIN, P. A.; XIE, P. CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution *J. Hydrometeorol.*, 5, pp. 487-502, 2004.

KALA, J., LYONS, T.J., ABBS, D., NAIR, U.S., Numerical simulations of the impacts of land-cover change on a southern sea breeze in southwest western Australia. *Boundary-Layer Meteorology* 135(3):485- 503, 2010. doi: 10.1007/s10546-010-9486-z

LAIRD, N.F., KRISTOVICH, D.A.R., LIANG, X.Z., ARRITT, R.W., LABAS, K., Lake Michigan Lake Breezes: climatology, local forcing, and synoptic environment. *J Appl Meteor* 40(3):409-424, 2001.

LIU, B.; LIU, F.; WANG, C.; MEI, S. Unit commitment considering flexibility and uncertainty of wind power generation. *Power Syst. Technol.* 2015, 39, 730–736.

MCPHERSON, R.D., A numerical study of the effect of a coastal irregularity on the sea breeze. *J Appl Meteor* 9(5):767-777, 1970.

MIAO, J.F., KROON, L.J.M., VILA-GERAU de ARELLANO, J., HOLTSLAG, B., Impacts of topography and land degradation on the sea breeze over eastern Spain. *Meteorol Atmos Phys* 84(3):157-170, 2003.

MICHOT, V.; VILA, D.; ARVOR, D.; CORPETTI, T.; RONCHAIL, J.; FUNATSU, B.M.; Dubreuil, V. Performance of TRMM TMPA 3B42 V7 in Replicating Daily Precipitation and Regional Precipitation Regimes in the Amazon Basin (1998–2013). *Remote Sens.* 2018, 10, 1879.

MOLION, L.C.B.; BERNARDO, S.O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. *Rev. Bras. Meteorol.* 2002, 17, 1–10.

MONTEIRO, J. E. B. A. Agrometeorologia dos Cultivos - o fator meteorológico na produção agrícola. 1. ed. Brasília-DF, INMET-MAPA, 2009.

MONTEIRO, J.E.B.A.; AZEVEDO, L.C.; ASSAD, E.D.; SENTELHAS, P.C. Rice yield estimation based on weather conditions and on technological level of production systems in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 48, n. 2, p. 123-131, 2013.

MORAES, A. V. C. DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE MODELOS AGROMETEOROLÓGICOS DE ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE PARA A CULTURA DA SOJA NA REGIÃO DE RIBEIRÃO PRETO, SP. Dissertação (Agronomia). Universidade de São Paulo / SP – Agrometeorologia, 1998.

MUÑOZ-SABATER, J.; DUTRA, E.; AGUSTÍ-PANAREDA, A.; ALBERGEL, C.; ARDUINI, G.; BALSAMO, G.; BOUSSETTA, S.; CHOULGA, M.; HARRIGAN, S.; HERBACH, H.; et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data* 2021, 13, 4349–4383.

NÓBREGA, R.S.; SANTIAGO, G.A.C.F. Tendência de temperatura na superfície do mar nos oceanos atlântico e pacífico e variabilidade de precipitação em Pernambuco. *Mercator*, 13, 107–118, 2014.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; SOUZA, P. H. A.; SOUZA, E. O.; et al., Climatologia da Chuva em Maceió: Aspectos Climáticos e Ambientais, *Revista Brasileira de Geografia Física* v.14, n.04, 2253-2264, 2021.

PAIXÃO, J. S.; ANDRADE, C. L. T.; GARCIA, A. G.; AMARAL, T. A.; NETO, A. J. S.; MARIN, F. R.; An alternative approach to the actual, brazilian maize crop zoning. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.13, n.3, p. 347-363, 2014.

PENMAN, H. L. Penman, estimating evaporation. *Transactions of the American Geophysical Union*, Washington, DC, v. 37, p. 43-50, 1956.

PROCÓPIO, S.O.; CRUZ, M.A.S.; ALMEIDA, M.R.; NOGUEIRA JUNIOR, L.R.; JESUS JÚNIOR, L.A.; SANTOS, N.S. SEALBA: Região de Alto Potencial Agrícola do Nordeste; Nota Técnica; Embrapa Tabuleiros Costeiros: Aracaju, SE, Brazil, 2016; p. 37.

PROCÓPIO, S. O.; SANTIAGO, A. D.; CARVALHO, H. W. L.; CRUZ, M. A. S. Estudos de cultivares de soja na região Agreste do SEALBA. Documento 220. EMBRAPA tabuleiros costeiros. Dezembro / 2018.

PROCÓPIO, S.O.; CRUZ, M.A.S.; ALMEIDA, M.R.; NOGUEIRA JUNIOR, L.R.; JESUS JÚNIOR, L.A.; SANTOS, N.S. SEALBA: Região de Alto Potencial Agrícola do Nordeste; Nota Técnica; Embrapa Tabuleiros Costeiros: Aracaju, SE, Brazil, 2019; p. 62.

REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *Rev. Bras. Meteorol.* 2010, 25, 185–204.

REIS, L. C. Produtividade da soja sob diferentes cenários de variabilidade climática na região do MATOPIBA, Brasil. 2020. 161 f. Tese (Doutorado Ciências Climáticas) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra. Natal/RN, 2020.

REIS, L.; SILVA, C.M.S.; BEZERRA, B.G.; MUTTI, P.R.; SPYRIDES, M.H.C.; SILVA, P.; MAGALHÃES, T.; FERREIRA, R.; RODRIGUES, D.; ANDRADE, L. Influence of Climate Variability on Soybean Yield in MATOPIBA, Brazil. *Atmosphere* 2020, 11, 1130.

RIBEIRO DA SILVA, A. L. B.; RIBEIRO DA SILVA, L. H. B.; DEMENECK VIEIRA, P. V.; FARIAS JUNIOR, C. A.; TONELLO, A. P.; FREITAS, P. S. L. Utilização do DSSAT na Simulação da Produção do Feijão Para a Época da Seca na Região de Tangará da Serra, MT. 2013, VIII EPCC.

ROCHA JÚNIOR, R.L.D.; SILVA, F.D.D.S.; COSTA, R.L.; GOMES, H.B.; HERDIES, D.L.; SILVA, V.D.P.R.D.; XAVIER, A.C. Analysis of the Space–Temporal Trends of Wet Conditions in the Different Rainy Seasons of Brazilian Northeast by Quantile Regression and Bootstrap Test. *GeoSciences* 2019, 9, 457.

RODRIGUES, O.; DIDONET, A. D.; LHAMBY, J. C. B., et al., Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo, *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v. 36, n. 3, p. 431-437, mar. 2001.

RODRIGUES, D.T.; SILVA, C.M.S.; REIS, J.S.; PALHARINI, R.S.A.; CABRAL JÚNIOR, J.B.; SILVA, H.J.F.; MUTTI, P.R.; BEZERRA, B.G.; GONÇALVES, W.A. Evaluation of the Integrated Multi-SatellitE Retrievals for the Global Precipitation Measurement (IMERG) Product in the São Francisco Basin (Brazil). *Water*, 13, 2714, 2021.

ROZANTE, J.R.; MOREIRA, D.S.; de GONÇALVES, L.G.G.; VILA, D.A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America. *Weather Forecast.* 2010, 25, 885–894.

ROZANTE, J.R.; GUTIERREZ, E.R.; FERNANDES, A.A.; VELA, D.A. Performance of precipitation products obtained from combinations of satellite and surface observations. *Int. J. Remote Sens.* 2020, 41, 7585–7604.

SALASSIER, B.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de Irrigação. Editora UFV, 625p, 8.ed, 2008.

SALINAS, A.R., SANTOS, D.S.B., SANTOS F.O. et al. Comportamiento de genotipos de soja, hasta el estadio de plantulas, en diferentes niveles de humedad. IN: CONFERENCIA MUNDIAL DE INVESTIGACION EN SOJA, 4., 1989, Buenos Aires. **Actas...** Buenos Aires: Asociacion Argentina de la Soja (AASOJA), 1989. p.376-382.

SALVADOR, M.A.; BRITO, J.I.B. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. *Theor. Appl. Climatol.* 2018, 133, 253–261.

SANTOS, S.R.Q.; CUNHA, A.P.M.A.; RIBEIRO-NETO, G.G. Avaliação de dados de precipitação para o monitoramento do padrão espaço-temporal da seca no Nordeste do Brasil. *Rev. Bras. Climatol.*, 25, 80–100, 2019.

SAURRAL, R.I.; CAMILLONI, I.A.; BARROS, V.R. Low-frequency variability and trends in centennial precipitation stations in southern South America. *Int. J. Climatol.* 2016, 37, 1774–1793.

SCHUH, G.E.; ALVES, E.R.A. O Desenvolvimento da Agricultura no Brasil; APEC: Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 1971; p. 369.

SENTELHAS, P.C.; BATTISTI, R.; MONTEIRO, L.A.; DUARTE, Y.C.N.; VISSER, F.A. Yield gap—Conceitos, definições e exemplos. *Inform. Agron.* 2016, 155, 9–12.

SHEFFIELD, J.; GOTETI, G.; WOOD, E.F. Development of a 50-Year High-Resolution Global Dataset of Meteorological Forcings for Land Surface Modeling. *J. Clim.* 2006, 19, 3088–3111.

SHEN, Z.; FU, G.; YU, C.; SUN, W.; ZHANG, X. Relationship between the Growing Season Maximum Enhanced Vegetation Index and Climatic Factors on the Tibetan Plateau. *Remote Sens.* 2014, 6, 6765–6789.

SILVA, B.F.P.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; PERESETSKY, A.; BRITO, B.M. Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas. *Rev. Bras. Meteorol.* 2011, 26, 323–338.

SILVA, F. D. S.; Cenários Climáticos Atuais e Futuros da Produtividade do Algodão Herbáceo no Nordeste do Brasil. 2014. 126 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, 2014.

SIONIT, N.; KRAMER, P. J. Effect of Water Stress During Different Stages of Growth of Soybean. *Agronomy Journal*, v. 66, march-april 1977, 274-278p.

SOUZA, D.C.; Oyama, M.D. Breeze Potential along the Brazilian Northern and Northeastern Coast. *J. Aerospace Technol. Manag.* 2017, 9, 368–378.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M.; Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.41, n.9, p.1351-1359, set. 2006.

TAVARES, L. C.; RUFINO, C. A.; BRUNES, A. P.; TUNES, L. M.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T. Desempenho de sementes de soja sob deficiência hídrica: rendimento e qualidade fisiológica da geração F1. *Ciência Rural*, Santa Maria / RS, v.43, n.8, p.1357-1363, ago, 2013.

TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE SOJA - Região Central do Brasil 2004. Londrina: Embrapa Soja; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Planaltina: Embrapa Cerrados; Belo Horizonte: EPAMIG; Uberaba: Fundação Triângulo, 2003. 237 p. (Sistemas de Produção, 4).

UPPALA, S.M.; KALLBERG, P.W.; SIMMONS, A.J.; ANDRAE, U.; BECHTOLD, V.C.; FIORINO, M.; GIBSON, J.K.; HASELER, J.; HERNANDEZ, A.; KELLY, G.A.; et al. The era-40 re-analysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2005, 131, 2961–3012.

UVO, C.R.B.; NOBRE, C.A. Zona de convergência intertropical (ZCIT) e a precipitação no Norte do Nordeste do Brasil. *Bol. Monit. Anál. Clim.* 1989, 4, 34–40.

VIANNA, M. S.; MARIN, F. R.; PILAU, F. G. Modelo agrometeorológico genérico de produção vegetal (MAGÉ). Dept. de Eng. de Biosistemas – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queroz” (USP). 2017.

WANG, J.; Li, M.; YU, C.; FU, G. The Change in Environmental Variables Linked to Climate Change Has a Stronger Effect on Aboveground Net Primary Productivity than Does Phenological Change in Alpine Grasslands. *Front. Plant Sci.* 2022, 12, 798633.

WOLLMANN, C.A., GALVANI, E., Zoneamento agroclimático: linhas de pesquisa e caracterização teórica-conceitual, *Soc. & Nat.*, Uberlândia, 25 (1): 179-190, 2013

WU, J.S.; FU, G. Modelling aboveground biomass using MODIS FPAR/LAI data in alpine grasslands of the Northern Tibetan Plateau. *Remote Sens. Lett.* 2018, 9, 150–159.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *Int. J. Climatol.* 36: 2644–2659. 2016.

